

# PRIMJENA PARAPETNOG ZIDA NA KRUNI VERTIKALNOG LUKOBRANA KAO MJERA PRILAGODBE KLIMATSKIM PROMJENAMA

---

Vidojević, Stjepan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:237:556318>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-21**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Stjepan Vidojević

**PRIMJENA PARAPETNOG ZIDA NA  
KRUNI VERTIKALNOG LUKOBRANA  
KAO MJERA PRILAGODBE  
KLIMATSKIM PROMJENAMA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Stjepan Vidojević

**PRIMJENA PARAPETNOG ZIDA NA  
KRUNI VERTIKALNOG LUKOBRANA  
KAO MJERA PRILAGODBE  
KLIMATSKIM PROMJENAMA**

DIPLOMSKI RAD

prof. dr. sc. Dalibor Carević

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Stjepan Vidojević

**APPLICATION OF PARAPET WALL ON A  
VERTICAL BREAKWATER AS A  
MEASURE OF ADAPTATION TO  
CLIMATE CHANGE**

MASTER THESIS

prof. dr. sc. Dalibor Carević

Zagreb, 2024.



**OBRAZAC 3**

**POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA**

Student/ica :

(Ime i prezime)

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

Mentor:

Potpis mentora:

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

Potpis:

S. Vidojević



## OBRAZAC 6

### IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

Potpis:

S. Vidojević





## SAŽETAK

Klimatske promjene imaju sve veći utjecaj na život ljudi i gospodarske i ekonomske procese. Kontinuirani porast globalne temperature i izdizanje razine mora iziskuju stalne prilagodbe kako bi kvaliteta života ljudi ostala na zadovoljavajućoj razini, a to se odražava i na građevinarstvo. Pri projektiranju pomorskih građevina nije dovoljno da građevina zadovoljava zahtjeve stabilnosti i sigurnosti u postojećim uvjetima već je potrebno planirati i za budućnost te podrobnim analizama i studijama pokušati predvidjeti klimatske uvjete u kojima će se građevina naći tokom svog projektnog razdoblja.

Jedna takva prilagodba opisana je u ovom diplomskom radu u vidu parapetnog zida koji se primjenjuje na postojeći lukobran kako bi konstrukcija ostala funkcionalna i u slučaju izdizanja razine mora do te mjere da već postojeća struktura ne bi bila dovoljna. Priložena je detaljna analiza valnih događaja potkrepljena numeričkim modelom kako bi se dokazala učinkovitost i isplativost izvođenja takve konstrukcije kao i prednosti koje bi takav projekt donio za društvo i gospodarstvene djelatnosti. Dan je prijedlog dimenzija i tehničkih karakteristika parapetnog zida koji će biti dostatne robusnosti da se odupre naletima valnih sila te u isto vrijeme minimalizirati prelijevanje preko istog kako bi se osigurala buduća funkcionalnost konstrukcije.

**Ključne riječi:** klimatske promjene, parapetni zid, lukobran, pomorske građevine, valna sila, prelijevanje.

## SUMMARY

Climate change has an increasing impact on people's lives and economic processes. The continuous increase in global temperature and rising sea levels require constant adaptations in order to maintain the quality of life, this is also reflected in the construction industry. When designing marine structures, it is not enough that the structure meets the requirements of stability and safety in existing conditions, but it is also necessary to plan for the future and try to predict the climatic conditions in which the structure will be found during its design period through detailed analysis and studies.

One such adaptation is described in this thesis in the form of a parapet wall that is applied to the existing breakwater so that the structure remains functional even in case of rising sea levels to such an extent that the existing structure would not be sufficient. A detailed analysis of wave events supported by a numerical model is attached in order to prove the efficiency and profitability of such a construction as well as the advantages that such a project would bring to society and economic activities. The dimensions and technical characteristics of the parapet wall have been proposed, which will be robust enough to withstand the surges of wave forces and at the same time minimize overflow in order to ensure the future functionality of the structure.

**Key words:** climate change, parapet wall, breakwater, marine structures, wave force, overflow

## SADRŽAJ

SAŽETAK.....	ii
SUMMARY.....	iii
SADRŽAJ .....	iv
1. Uvod.....	1
2. Pregled metoda prilagodbe klimatskim promjenama .....	4
3. Numerička studija opterećenja i prelijevanja parapetnog zida vertikalnog lukobrana .....	9
3.1. Numerički model.....	9
3.2. Analiza tlakova te pripadajućih sila na parapetni zid i lukobran .....	12
3.3. Analiza prelijevanja preko krune parapetnog zida.....	17
3.4. Rezultati numeričkih simulacija i empirijskih modela .....	25
4. Proračun opterećenja po Godinoj metodi .....	26
5. Proračun mehaničke otpornosti i stabilnosti parapetnog zida.....	40
5.1. Kontrola rotacije (EQU).....	43
5.2. Kontrola klizanja (GEO+STR) .....	45
6. Troškovnik izvedbe parapetnog zida na postojećim lukobranima .....	48
7. Zaključak .....	49
POPIS LITERATURE.....	51
POPIS SLIKA .....	52
POPIS TABLICA .....	55

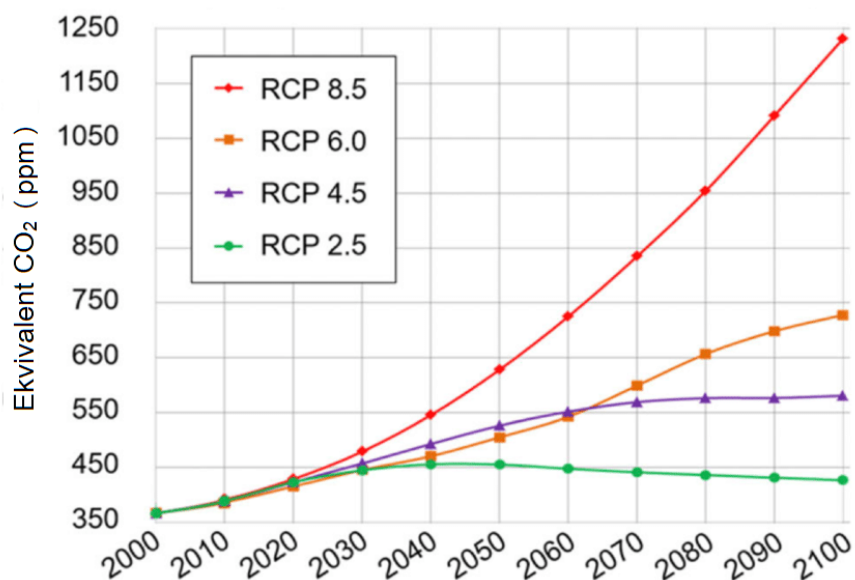
## 1. Uvod

Klimatske promjene po definiciji predstavljaju dugotrajne promjene u statističkoj raspodjeli klimatskih faktora koje se manifestiraju u razdoblju od 10 do milijun godina. Utjecajni faktori koji uzrokuju klimatske promjene nazivaju se prisilna djelovanja, a neki od njih su promjene u Sunčevom toplinskom zračenju, odstupanje od Zemljine planetarne putanje ili orbite, promjenjiva tektonika ploča i pomicanje kontinenata, te promjene u koncentraciji stakleničkih plinova.

U posljednje vrijeme sve veći fokus se stavlja na ljudski utjecaj na klimatske promjene. Razna istraživanja i studije proučavaju ovu problematiku te tvrde da su promjene u klimi gotovo u potpunosti pod utjecajem ljudskog djelovanja što dovodi do potrebe za smanjenjem ljudskog utjecaja, sprječavanje daljnjeg razvoja klimatskih promjena te za prilagodbom na promjene koje su se već dogodile. Najveći pokazatelji ljudskog utjecaja su povećana koncentracija CO<sub>2</sub> u atmosferi, ubrzana potrošnja fosilnih goriva, povećana razina krutih čestica u zraku, zabrinjavajuća rata deforestacije te povećanje obradivih površina.

Kao ilustracija utjecaja na klimatske promjene osmišljeni su scenariji poznati kao reprezentativni koncentracijski putovi (RCP) koji predviđaju buduću koncentraciju stakleničkih plinova u Zemljinoj atmosferi. Četiri su osnovna scenarija – RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 i RCP 8.5 od kojih svaki predstavlja jednu od mogućih situacija u 2100. godini, a imenovani su po vrijednosti moguće promjene u energiji u atmosferi u W/m<sup>2</sup>. Scenariji su prihvaćeni od strane Međuvladinog panela o klimatskim promjenama (IPCC) te se nalaze u širokoj primjeni kod modeliranja projekata koji ovise o budućim klimatskim uvjetima. Više vrijednosti RCP trajektorija predstavljaju veću koncentraciju stakleničkih plinova te samim time višu globalnu temperaturu i brži razvoj negativnih klimatskih faktora dok su niže vrijednosti pogodnije za ljudski život, ali zahtijevaju iznimno velike napore i suradnju svih zemalja kako bi se smanjila razina ljudskog utjecaja na klimu. Trajektorije reprezentativnih koncentracijskih putova prikazane su na slici 1.

Reprezentativni koncentracijski putovi prema IPCC-u



Sl. 1 Grafički prikaz trajektorija koje predstavljaju scenarije reprezentativnih koncentracijskih putova za 21. stoljeće

Reprezentativni koncentracijski putovi također predviđaju i porast globalne temperature koji odgovara svakom pojedinom putu kao i globalni porast morske razine čija problematika će pobliže biti obrađena u ovom diplomskom radu. U tablicama 1 i 2 dani su potencijalni rasponi predviđenog porasta ovih klimatskih faktora do kraja 21. stoljeća.

Tablica 1 Predviđene razine porasta globalne temperature po RCP scenarijima za 21. stoljeće

Scenarij	2046. - 2065.	2081. - 2100.
	[°C]	[°C]
RCP 2.6	0.4 - 1.6	0.3 - 1.7
RCP 4.5	0.9 - 2.0	1.1 - 2.6
RCP 6	0.8 - 1.8	1.4 - 3.1
RCP 8.5	1.4 - 2.6	2.6 - 4.8

*Tablica 2 Predviđene razine izdizanja srednje razine mora prema RCP scenarijima za 21. stoljeće*

Scenarij	2046.-2065	2081.-2100.
	[m]	[m]
RCP 2.6	0.17 - 0.32	0.26 - 0.55
RCP 4.5	0.19 - 0.33	0.32 - 0.63
RCP 6	0.18 - 0.32	0.33 - 0.63
RCP 8.5	0.22 - 0.38	0.45 - 0.82

Kao što je gore navedeno klimatske promjene sve više imaju utjecaj na izdizanje razine mora stoga je pri planiranju zahvata potrebno uzeti u obzir buduće utjecaje klimatskih promjena.

Izdizanje razine mora je još uvijek neistražen proces te su najbolja predviđanja još uvijek poprilično neprecizna stoga je kod projektiranja građevina od iznimne važnosti uračunati potencijalne rizike koji bi mogli u budućnosti narušiti stabilnost istih. Kod izgradnje lukobrana u najvećem broju slučajeva potrebno je osigurati da nema prelijevanja te da se isti može koristiti za različite funkcije poput prometa vozila i pješaka, utovara i istovara robe te pristajanja brodova uz dostatnu razinu sigurnosti svih korisnika.

Što se tiče pomorskih obrambenih građevina koje štite ljude, projektanti i vlasnici tih obrambenih sustava također moraju voditi računa o potencijalnim izravnim opasnostima od prelijevanja. To zahtijeva da se procijeni razina opasnosti i njena vjerojatnost pojavljivanja, što omogućuje izradu odgovarajućih akcijskih planova za smanjenje rizika koji proizlaze iz prelijevanja. Takvi planovi mogu biti ograničenje prelijevanja valova tijekom jakih oluja, ali također mogu, a ponekad i moraju predvidjeti isključivanje ljudi i/ili vozila iz prometa tijekom jakih oluja kada može doći do prelijevanja. Potonje je posebno primjenjivo za strukture koje omogućuju pristup ljudima u normalnim uvjetima. U ovom diplomskom radu dan je primjer lukobrana tipa zid te parpaetnog zida koji će na njemu biti izveden da bi se svi potrebni zahtjevi uspješno zadovoljili.

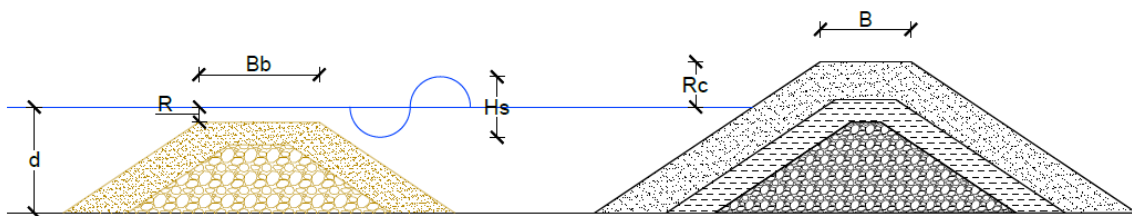
## 2. Pregled metoda prilagodbe klimatskim promjenama

Glavna zadaća kod projektiranja lukobrana je osigurati stabilnost konstrukcije, osigurati sigurnost šticećenog područja od naleta morskih valova te potpuno sprječavanje ili smanjenje prelijevanja do razine koja nije opasna za ljude i imovinu. Većina modela koji proučavaju problem opterećenja kojima je lukobran tipa zid izložen baziraju se na proračunu valne sile Godinom metodom često uparenom s Takahashijevom formulom, no s obzirom na nepredvidivost valnih uvjeta, gotovo je nemoguće precizno definirati sve parametre da bi se u potpunosti zadovoljili gore navedeni zahtjevi. Tijekom projektiranja ili sigurnosne procjene lukobrana, visina krune ne ovisi samo o naletu ili prelijevanju vala. Također treba voditi računa o referentnoj razini, lokalnim naglim udarima i oscilacijama (koje dovode do korigiranog vodostaja), slijeganju i porastu razine vode zbog porasta razine mora.

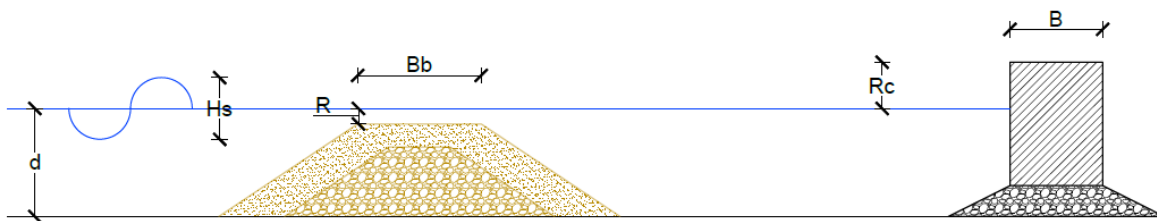
Činjenica je da bi zbog iznimnih veličina ovih konstrukcija optimizacijom određenih faktora pri projektiranju kao što su smanjenje sila koje djeluju na tijelo lukobrana, poboljšanje hidrauličkih svojstava ili smanjenjem prelijevanja bez velikih utjecaja na dimenzije same konstrukcije bilo moguće ostvariti značajne uštede pri izgradnji. U nastavku je priloženo nekoliko potencijalnih metoda kojima bi takav zadatak bilo moguće ostvariti.

### a) Izgradnja manjeg valoloma ispred glavnog lukobrana

Izgradnjom manjeg valoloma ispred glavnog lukobrana razbija se nadolazeći val te se smanjuje njegova energija čime se ublažuje udar vala na konstrukciju glavnog lukobrana. Ova metoda je učinkovita, ali ovisi o dubini vode ispred lukobrana te, ovisno o dimenzijama i količini raspoloživog materijala u blizini, može biti jako skupo rješenje.



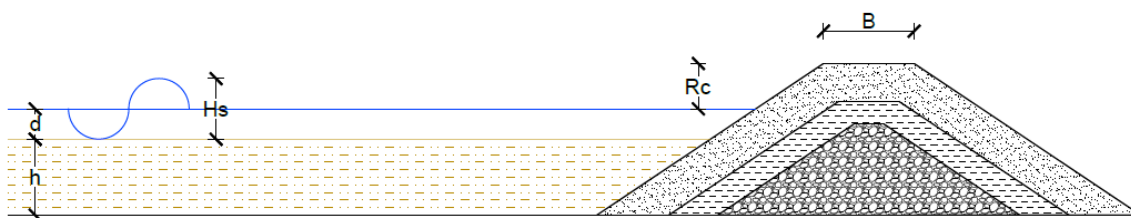
Sl. 2 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu izgradnje valoloma ispred glavnog lukobrana tipa nasip



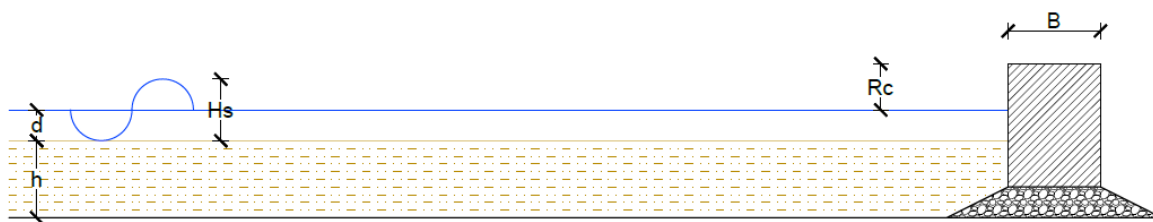
Sl. 3 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu izgradnje valoloma ispred glavnog lukobrana tipa zid

b) Nasipavanje područja ispred lukobrana materijalom

Nasipavanje terena rezultira smanjenjem dubine u području ispred lukobrana tako što onemogućava formiranje valova velike valne visine te smanjuje energiju nadolazećih valova na konstrukciju lukobrana. Ovaj postupak uvelike ovisi o količini materijala podobnog za nasipavanje te području koje treba nasuti. Ova metoda prigodna je kod manjih lukobrana opterećenih iznimno velikim naletima valova prvenstveno zbog količine materijala koju je potrebno ugraditi.



Sl. 4 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu nasipavanja terena neposredno ispred lukobrana tipa nasip

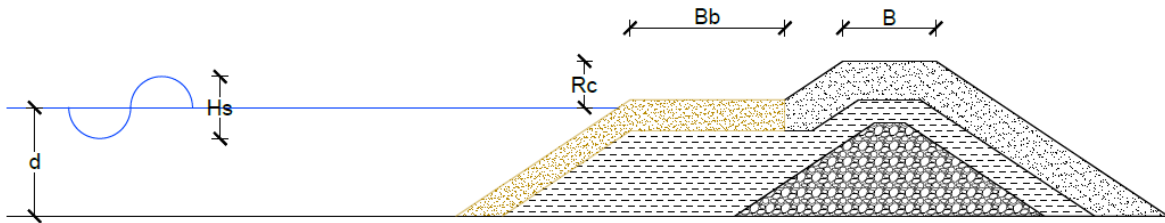


Sl. 5 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu nasipavanja terena neposredno ispred lukobrana tipa zid

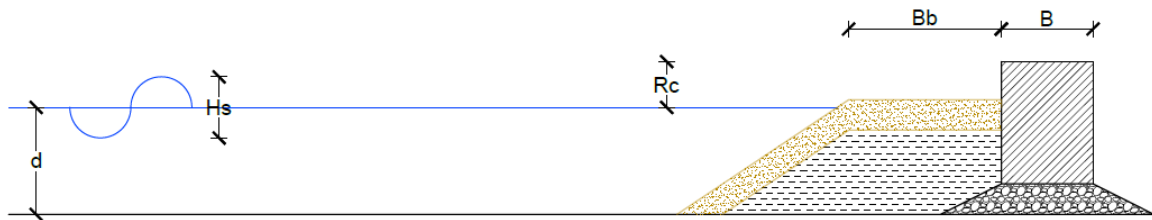


### c) Izgradnja berme

Izgradnjom berme disipira se energija nadolazećeg vala neposredno pred samim tijelom lukobrana te se na taj način smanjuje opterećenje na lukobran. Berma se uglavnom izvodi od nasutog materijala s betonskom oblogom te predstavlja razumno ekonomično i jednostavno rješenje za smanjenje utjecaja valova na lukobran.



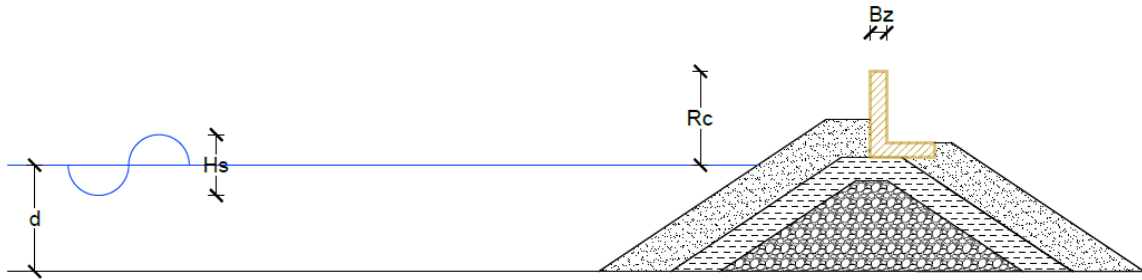
Sl. 6 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu izgradnje berme na lukobranu tipa nasip



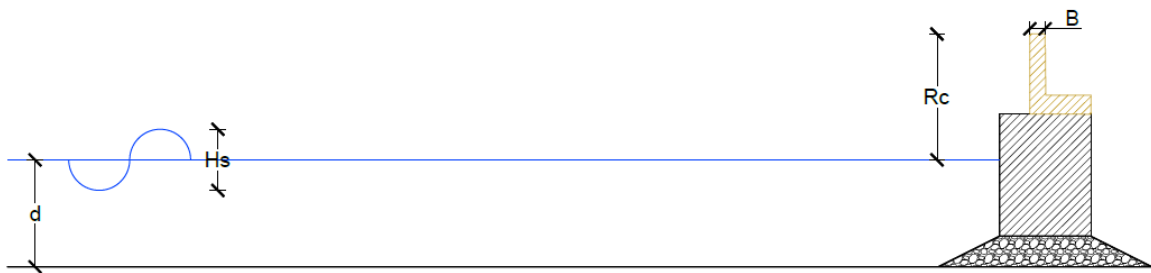
Sl. 7 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu izgradnje berme na lukobranu tipa zid

### d) Izgradnja betonskog parapeta

Izgradnjom betonskog parapeta na kruni lukobrana povećava se ukupna visina kojom se lukobran odupire preljevanju. Ova metoda ne utječe na silu udara vala, ali učinkovito sprječava prelijevanje. Zid može biti postavljen na vanjsku konturu i na sredinu lukobrana te je njegovo izvođenje najekonomičnija metoda no mora se uzeti u obzir i funkcionalnost samog lukobrana stoga ga nije uvijek moguće izvesti.



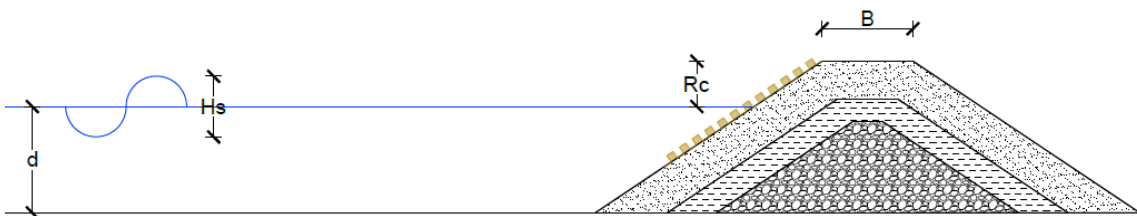
Sl. 8 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu izgradnje betonskog parapetnog zida na kruni lukobrana tipa nasip



Sl. 9 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu izgradnje betonskog parapetnog zida na kruni lukobrana tipa zid

e) Povećanje hrapavosti vanjskog pokosa

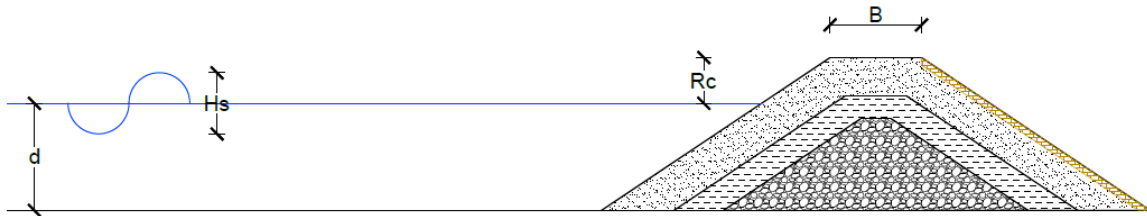
Povećanjem hrapavosti vanjskog pokosa lukobrana onemogućuje se uspinjanje vala uz isti. Ova metoda primjenjiva je samo na lukobrane tipa nasip te je iznimno jednostavna za izvođenje no nije primjenjiva kod većih naleta valova zbog slabog djelovanja.



Sl. 10 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu povećanja hrapavosti vanjskog pokosa lukobrana tipa nasip

f) Ojačanje unutarnjeg pokosa lukobrana

Ojačanje unutarnjeg pokosa lukobrana sprječava narušavanje stabilnosti konstrukcije pri prelijevanju preko krune lukobrana. Ova metoda primjenjiva je samo na lukobrane tipa nasip, a ne nalazi široku uporabu upravo jer omogućava prelijevanje.



*Sl. 11 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu ojačanja unutarnjeg pokosa lukobrana tipa nasip*

U nastavku će se pobliže obraditi problematika vezana za izgradnju betonskog parapetnog zida na vertikalni lukobran.

### 3. Numerička studija opterećenja i prelijevanja parapetnog zida vertikalnog lukobrana

Za potrebe ovog diplomskog rada korišten je 3D numerički model postavljen i proveden na Zavodu za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Diplomski rad se odnosi samo na obradu rezultata numeričkog modela, ne i na samu metodologiju postavljanja numeričkog modela. U nastavku se daje kratki opis numeričkog modela.

Analizirana je dinamika tlakova uzduž vanjske konture parapetnog zida na gravitacijskom lukobranu bez školjere pri djelovanju spektralnih (JONSWAP ;  $\gamma = 3.3$ ,  $\sigma_1 = 0.07$ ,  $\sigma_2 = 0.09$ ) i monokromatskih valova, te dinamika prelijevanja samo pri djelovanju spektralnih valova. U okviru provedenih analiza varirane su značajne valne visine  $H_s$  i vršni valni periodi  $T_p$  ( $H_s = 3$  m,  $T_p = 6.3$  s ;  $H_s = 3.5$  m,  $T_p = 6.9$  s) kod spektralnih valova, odnosno valne visine  $H$  i periodi  $T$  kod monokromatskih valova ( $H = 3$  m,  $T = 6.3$  s ;  $H = 3.5$  m,  $T = 6.9$  s ; strmost vala  $L/H = 21$ ) te dubine ispred lukobrana (8 m, 6 m i 4 m). Nagib dna je konstantan (1:30) u svim provedenim simulacijama. Parapetni zid analiziran je u dvije konfiguracije, u prvoj sa izvedbom na vanjskoj strani lukobrana, te u drugoj sa izmicanjem na sredinu lukobrana.

#### 3.1. Numerički model

Za provedbu numeričkih simulacija korišten je model Flow-3D ([www.flow3d.com](http://www.flow3d.com)). Model je razvijen u Los Alamos National Laboratory tijekom 70-tih godina, te je do današnjih dana kontinuirano razvijan i nadograđivan od strane tvrtke Flow Science, Inc. (Hirt and Nicholas, 1998., Prosperetti i Tryggvason, 2007.; Bombardelli i sur., 2011.; Bombardelli, 2012.). Baziran je na metodi konačnih volumena i Eulerovom pristupu kojima se rješava sustav jednačbi očuvanja mase, količine gibanja i energije. Koristi se strukturirana proračunska mreža u Cartesijevom koordinatnom sustavu, a rubni uvjeti definiraju se na 6 oplošnih ploha diskretizacijskog proračunskog bloka. Proračunski kod koristi tzv. "Volume of Fluid" (VOF) formulaciju za inkorporiranje nepropusnih granica u proračunsku mrežu i odgovarajući sustav jednačbi. 3D nepropusni objekti se tretiraju kao skup konačnih volumena sa pripadnim površinama, a čime je podržana mogućnost rješavanja sustava diferencijalnih jednačbi na ortogonalnoj i strukturiranoj mreži. Proračun slobodne površine se provodi VOF tehnikom baziranom na volumnoj frakciji svake proračunske 3D ćelije. Jednačba očuvanja mase (jednačba kontinuiteta) i jednačba očuvanja količine gibanja (Navier-Stokes jednačba) u Cartesiovom koordinatnom sustavu glase:

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = R_{DIF} + R_{SOR}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left( uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left( uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left( uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z$$

gdje su:

- u, v, z komponente vektora brzine u smjerovima x, y, z;
- RDIF član turbulentne difuzije; p tlak;
- RSOR član izvora ili ponora;  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$  proticajni poprečni presjek u proračunskoj ćeliji;
- $\rho$  gustoća tekućine (usvojeno 1028 kg/m<sup>3</sup>);
- $G_z$  gravitacijsko ubrzanje;
- $f_x$ ,  $f_y$ ,  $f_z$  ubrzanje usljed viskoznog djelovanja u smjerovima x, y, z temeljem divergencije tenzora viskoznog naprežanja  $\sigma$  ( $(1/\rho)\nabla \cdot \sigma$ );
- $V_f$  volumna frakcija kapljevine (fluida) u proračunskoj ćeliji proračunata temeljem jednadžbe prikazane u nastavku.

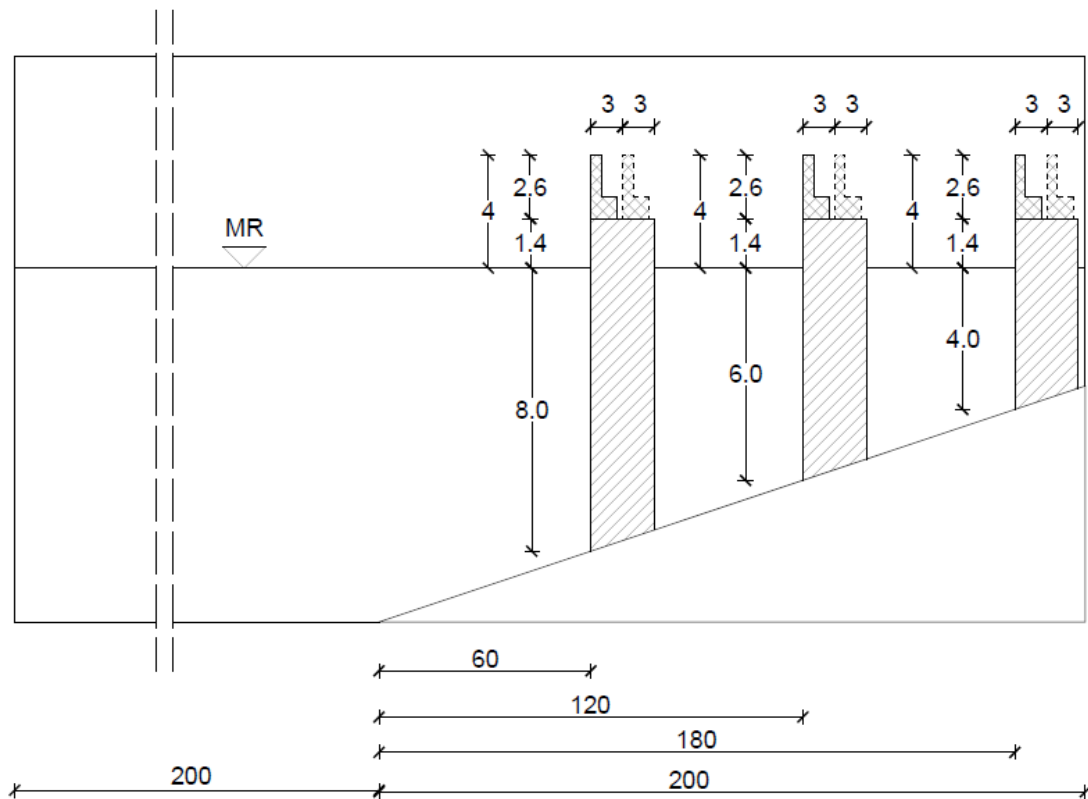
$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[ \frac{\partial (FA_x u)}{\partial x} + \frac{\partial (FA_y v)}{\partial y} + \frac{\partial (FA_z w)}{\partial z} \right] = 0$$

gdje je vrijednost volumne frakcije F sa kojom se prezentira količina kapljevine u svakoj proračunskoj ćeliji poprima vrijednosti od 0 do 1 (0 – ćelija potpuno ispunjena plinom, 1 – ćelija potpuno ispunjena kapljevinom).

Numerički kanal (2D vertikalni presjek) ima horizontalno dno na 10 m dubine u početnoj duljini od 200 m, nakon čega se dubina kontinuirano smanjuje usljed konstantnog nagiba dna (1:30). Profil lukobrana je postavljen 60 m od početka nagiba dna (260 m od početka numeričkog kanala) u slučaju lukobrana na dubini 8 m. U slučaju lukobrana na dubini od 6 m, profil lukobrana je postavljen 120m od početka nagiba dna (320m od početka numeričkog kanala), dok je u slučaju lukobrana na dubini od 4 m, profil lukobrana postavljen 180m od početka nagiba dna (380m od početka numeričkog kanala). Geometrijska konfiguracija numeričkog valnog kanala prikazana je na slici 12.

Primijenjuje se prostorna diskretizacija proračunske mreže sa ćelijama ekvidistantnih duljina u x, y, i z smjeru  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.2$  m. U provedbi simulacija koristi se RNG k- $\epsilon$  model turbulencije (Yakhot i Orszag, 1986.; Yakhot i Smith, 1992.), a transfer topline nije potrebno uzeti u obzir obzirom na analiziranu problematiku. Član tlaka rješava se implicitnom metodom, tzv. IGMRES (Improved Generalised Minimal residual), a viskozna naprežanja eksplicitno.

Rubni uvjeti uključuju JONSWAP spektralne valove na ulazu u proračunsku mrežu, rubni uvjet simetrije na bočnim stranama (širina modelske domene 0.2m). Za dno se koristi rubni uvjet nepropusne granice (zid), a za gornji rub atmosferski tlak. Početni uvjeti se zadaju kao stanje mirovanja vode sa slobodnom površinom postavljenom na mirnoj razi, te hidrostatskom raspodjelom tlaka.



*Sl. 12 Shematski prikaz geometrije numeričkog valnog kanala i analiziranih vertikalnih presjeka lukobrana sa parapetnim zidovima*

U tablicama 1 i 2 dana je nomenklatura provedenih numeričkih simulacija. Simulacije obuhvaćaju period od 600s.

Tablica 3 Nomenklatura provedenih numeričkih simulacija – spektralni valovi

Simulacija	Hs (m)	Rc/Hs	dubina lukobrana (m)	Parapetni zid
1	3.5	1.14	8	vanjski
2	3	1.33	8	vanjski
3	3.5	1.14	6	vanjski
4	3	1.33	6	vanjski
5	3.5	1.14	4	vanjski
6	3	1.33	4	vanjski
7	3.5	1.14	8	sredina
8	3	1.33	8	sredina
9	3.5	1.14	6	sredina
10	3	1.33	6	sredina
11	3.5	1.14	4	sredina
12	3	1.33	4	sredina

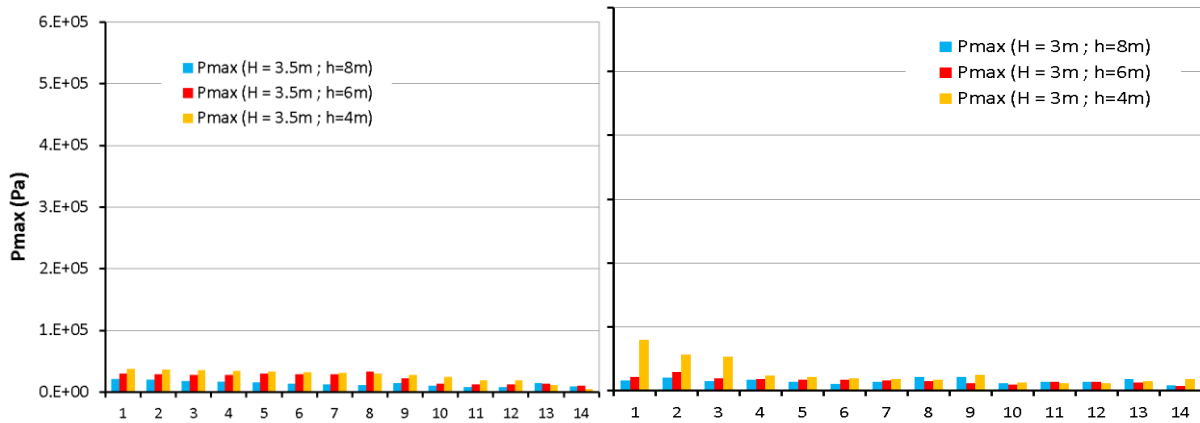
Tablica 4 Nomenklatura provedenih numeričkih simulacija – monokromatski valovi

Simulacija	H (m)	Rc/H	dubina lukobrana (m)	Parapetni zid
13	3.5	1.14	8	vanjski
14	3	1.33	8	vanjski
15	3.5	1.14	6	vanjski
16	3	1.33	6	vanjski
17	3.5	1.14	4	vanjski
18	3	1.33	4	vanjski
19	3.5	1.14	8	sredina
20	3	1.33	8	sredina
21	3.5	1.14	6	sredina
22	3	1.33	6	sredina
23	3.5	1.14	4	sredina
24	3	1.33	4	sredina

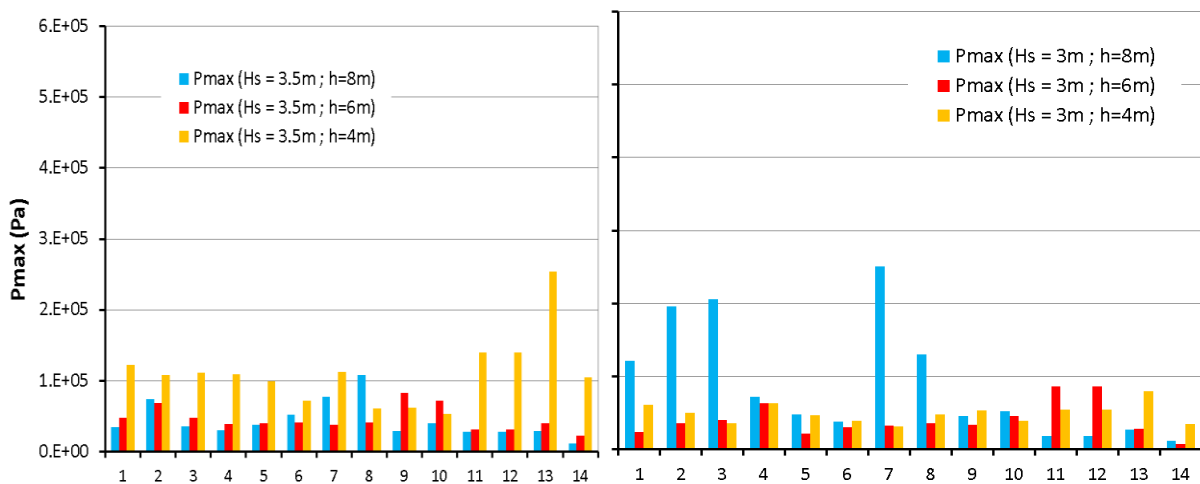
### 3.2. Analiza tlakova te pripadajućih sila na parapetni zid i lukobran

U sklopu numeričkog modela analizirani su tlakovi uzrokovani naletima monokromatskih i spektralnih valova valnih visina  $H(H_s) = 3$  m i  $H(H_s) = 3.5$  m. Uočeno je da su tlakovi

zabilježeni kod naleta spektralnih valova znatno veći od onih uzrokovanih monokromatskim valovima. Nadalje, evidentno je da su vrijednosti tlakova kada je parapetni zid postavljen na sredini lukobrana i do nekoliko puta veće od istih vrijednosti na rubu te da se maksimalni tlakovi javljaju na dodirnoj plohi parapetnog zida i lukobrana. Maksimalni modelski tlakovi na svim numeričkim tlakomjerima (od 1 u korjenu parapetnog zida do 14 na vrhu parapetnog zida) tijekom simulacijskog razdoblja od 600s prikazani su na slikama 13-16.

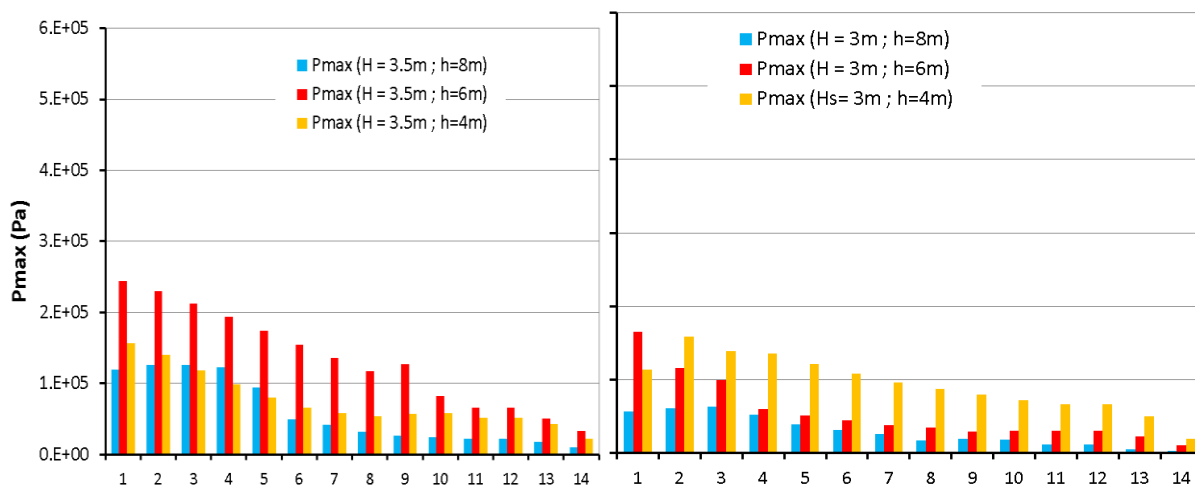


Sl. 13 Maksimalni modelski tlakovi na svim numeričkim tlakomjerima (od 1 u korjenu parapetnog zida do 14 na vrhu parapetnog zida) tijekom simulacijskog razdoblja od 600s za monokromatske valove  $H = 3\text{ m}$  i  $H = 3.5\text{ m}$  kada je parapetni zid na rubu lukobrana

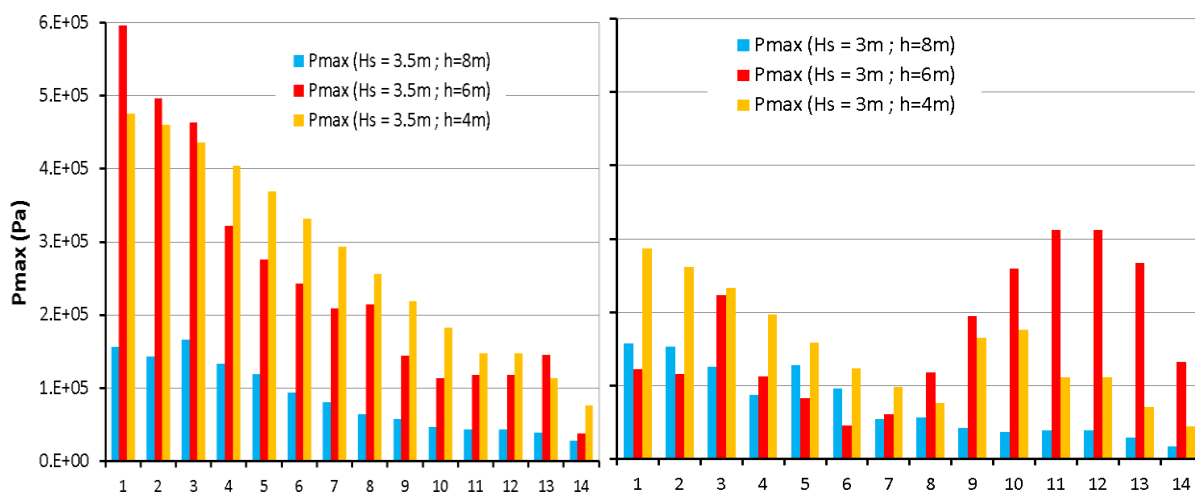


Sl. 14 Maksimalni modelski tlakovi na svim numeričkim tlakomjerima (od 1 u korjenu parapetnog zida do 14 na vrhu parapetnog zida) tijekom simulacijskog razdoblja od 600s za spektralne valove  $H_s = 3\text{ m}$  i  $H_s = 3.5\text{ m}$  kada je parapetni zid na rubu lukobrana





Sl. 15 Maksimalni modelski tlakovi na svim numeričkim tlakomjerima (od 1 u korjenu parapetnog zida do 14 na vrhu parapetnoig zida) tijekom simulacijskog razdoblja od 600s za monokromatske valove  $H = 3\text{ m}$  i  $H = 3.5\text{ m}$  kada je parapetni zid na sredini lukobrana

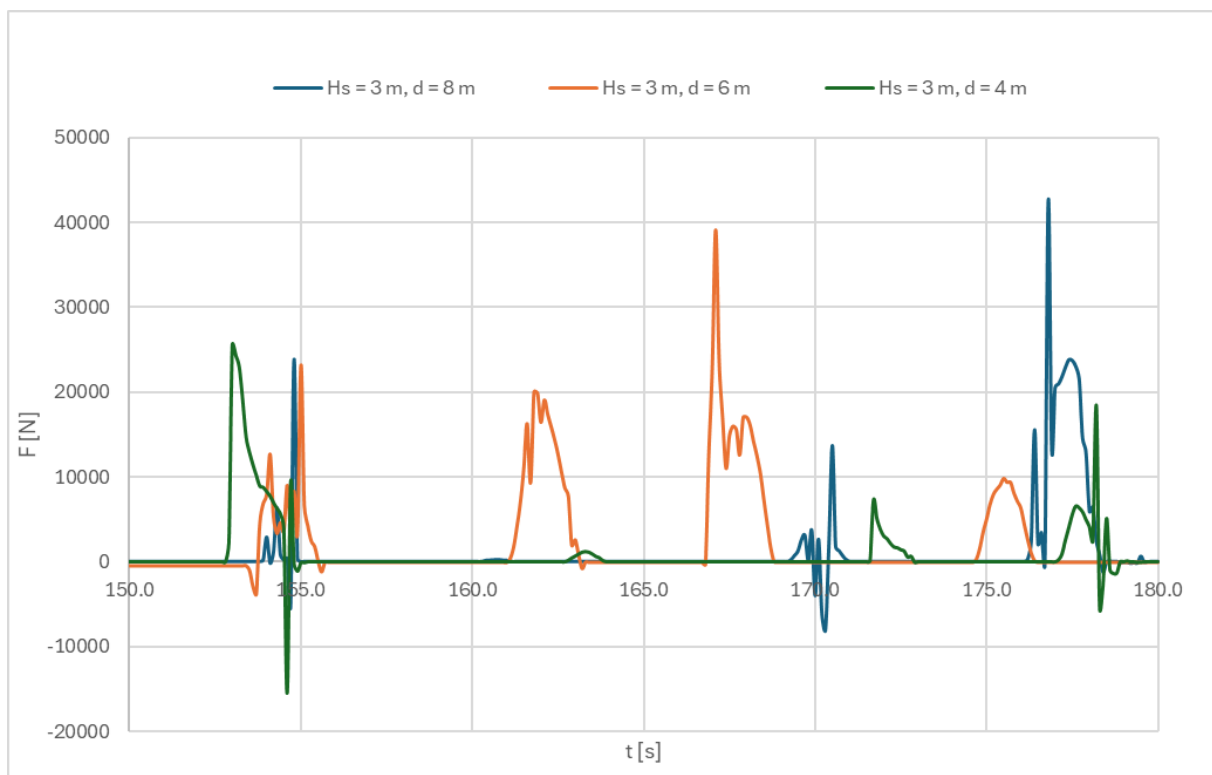


Sl. 16 Maksimalni modelski tlakovi na svim numeričkim tlakomjerima (od 1 u korjenu parapetnog zida do 14 na vrhu parapetnoig zida) tijekom simulacijskog razdoblja od 600s za spektralne valove  $H_s = 3\text{ m}$  i  $H_s = 3.5\text{ m}$  kada je parapetni zid na sredini lukobrana

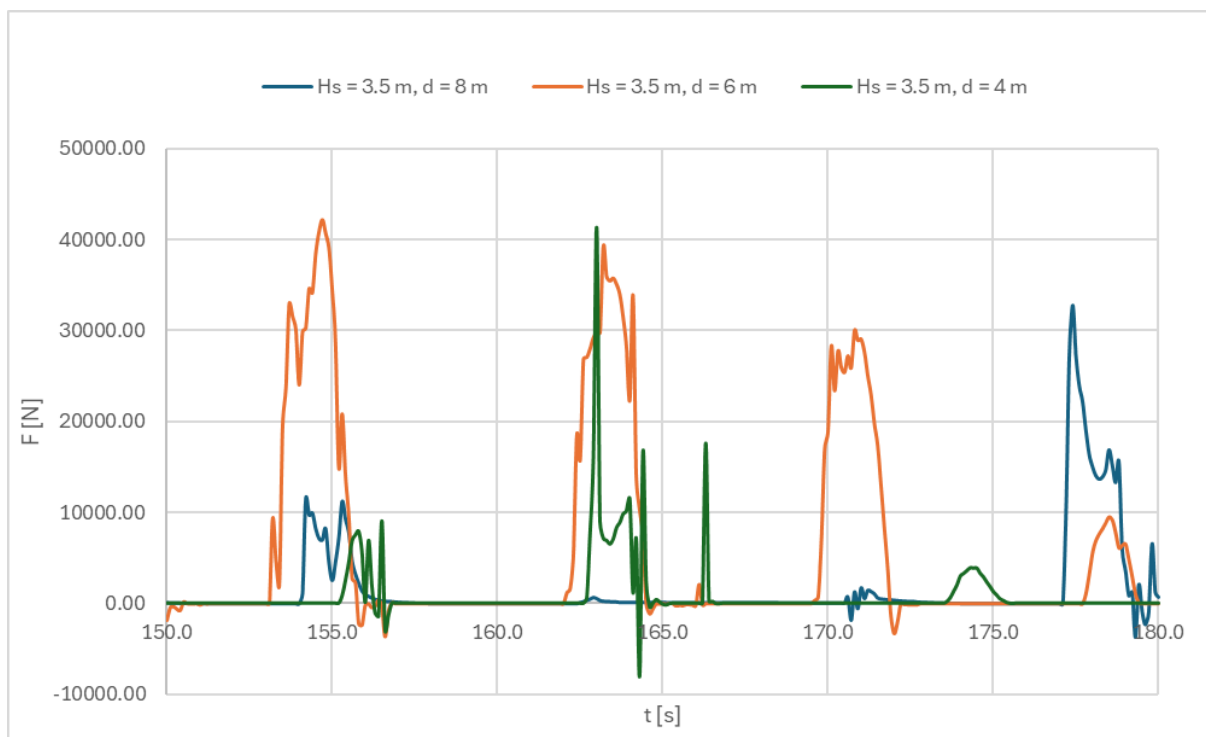
Analizirane su sile tlaka na parapetni zid postavljen na rubu i sredini vertikalnog lukobrana za spektralne valove valnih visina  $H_s = 3\text{ m}$  i  $H_s = 3.5\text{ m}$  te lukobrane postavljene na dubini od 4, 6 i 8 metara. Sile su dobivene integracijom zabilježenih vrijednosti tlakova od točke kontakta parapetnog zida i lukobrana do kote krune parapetnog zida te je izrađen prigodan dijagram sila u vremenu. Kao reprezentativni period odabran je vremenski inkrement između 150. i 180. sekunde provođenja simulacije jer se u njemu pojavljuju najveći iznosi sila na parapetni zid. Uočeno je da oscilacije sile tlaka jasno ocrtavaju simultane dolaske valnog grebena do zida te da se maksimalna sila pojavljuje u trenutku kada je val superponiran na konturi istog dok za

vrijeme dola vala tlakovi pokazuju vrijednost 0 jer u tom trenutku nema kontakta između morske vode i tijela konstrukcije. Također vidljivo je da su sile tlaka koje djeluju na parapet kada je postavljen na sredinu i do 10 puta veće od sila koje djeluju na parapet postavljen na rub lukobrana. To se može opisati kao fenomen zračnog mjehura koji ostaje „zarobljen“ između konture parapetnog zida i krune lukobrana te pod pritiskom vodnog vala eksplodira i uzrokuje trenutni izniman porast sile kao što je vidljivo na slikama 19 i 20. Ova teza se dalje može potkrijepiti činjenicom da gotovo sve maksimalne sile u modelu traju iznimno kratko (prosječno 0.1 do 0.2 sekunde) što nije prirodna vremenska raspodjela kao što je vidljivo na slikama 17 i 18.

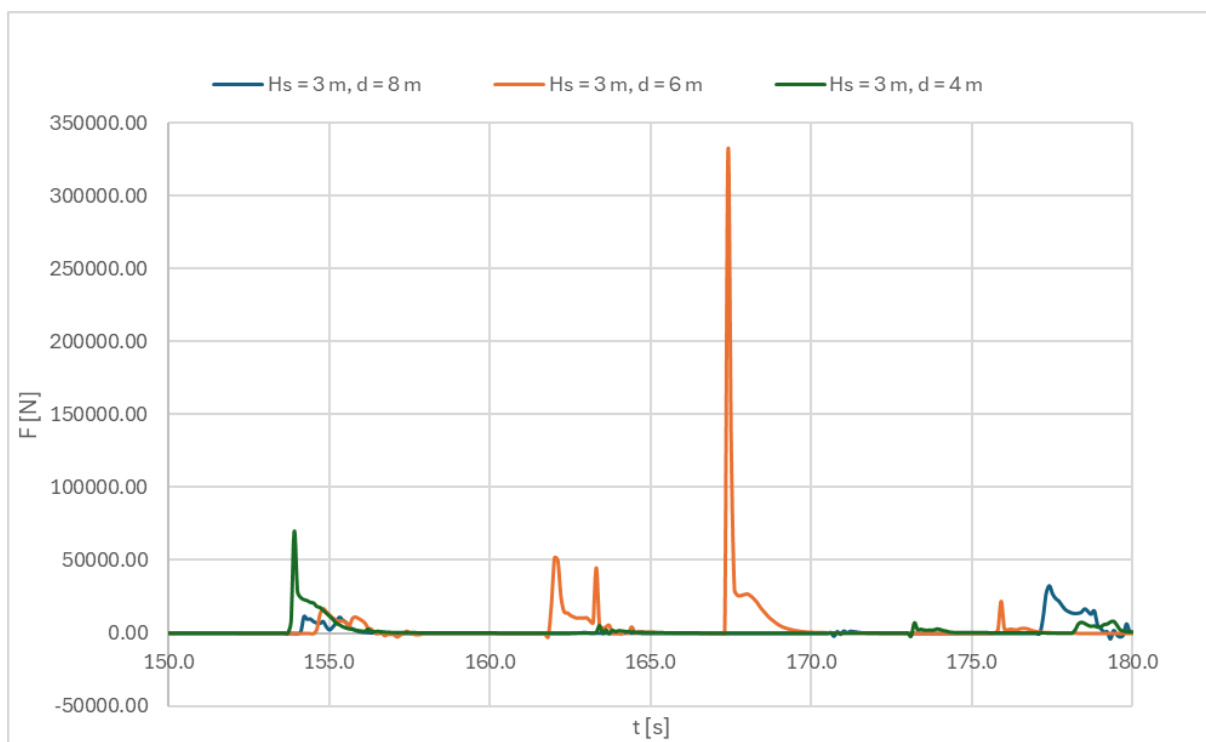
Dinamika sile tlaka po površini vanjske konture parapetnog zida na kojoj se nalaze tlakomjeri (integracija sa 14 numeričkih tlakomjera) prikazana je na slikama u nastavku.



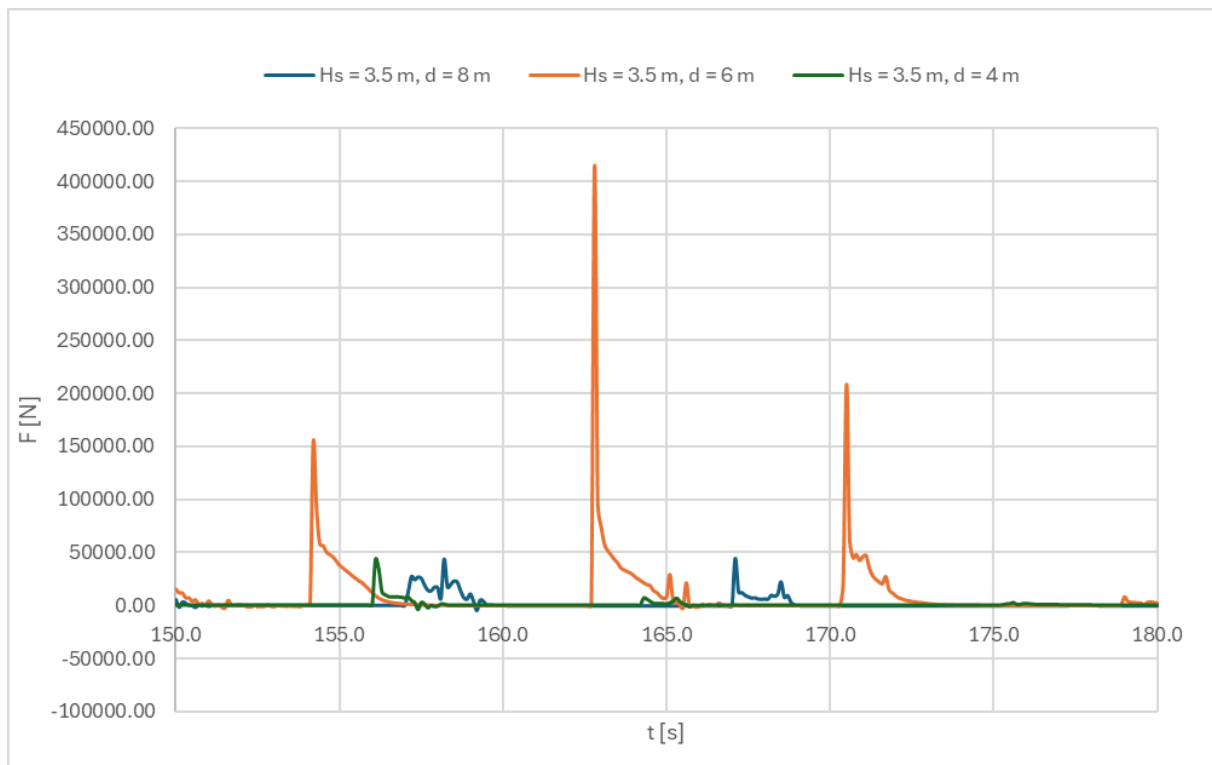
Sl. 17 Dinamika sile tlaka po  $m'$  vanjske konture parapetnog zida na kojoj se nalaze numerički tlakomjeri (analize 1,3,5  $H_s = 3\text{ m}$  ; parapetni zid na vanjskoj konturi lukobrana)



*Sl. 18 Dinamika sile tlaka po m' vanjske konture parpaetnog zida na kojoj se nalaze numerički tlakomjeri (analize 2,4,6  $H_s = 3.5$  m ; parapetni zid na vanjskoj konturi lukobrana)*



*Sl. 19 Dinamika sile tlaka po m' vanjske konture parapetnog zida na kojoj se nalaze numerički tlakomjeri (analize 7,9,11  $H_s = 3$  m ; parapetni zid uvučen za 3m)*



Sl. 20 Dinamika sile tlaka po  $m'$  vanjske konture parapetnog zida na kojoj se nalaze numerički tlakomjeri (analize 8,10,12  $H_s = 3.5$  m ; parapetni zid uvučen za 3m)

Zanimljivo je kako se gotovo sve maksimalne sile tlaka u modelu javljaju na parapetnom zidu postavljenom na lukobran na dubini od 6 metara. Stoga je provedena analiza sila na čitavu konstrukciju lukobrana zajedno s parapetnim zidom postavljenim na rub te na sredinu istog za monokromatske i spektralne valove valnih visina  $H(H_s) = 3$  m i  $H(H_s) = 3.5$  m. 38 numeričkih tlakomjera raspoređeno je na razmacima od 0.2 m od vrha krune parapetnog zida do dubine 3.4 m. Opširnije o rezultatima ovog numeričkog modela opisano je u sljedećem poglavlju.

### 3.3. Analiza prelijevanja preko krune parapetnog zida

Preljevanje valova je fenomen interakcije vala i konstrukcije koji se sastoji od prelaska dijela vala preko vrha konstrukcije u obliku kontinuiranog sloja vode ili prskanja. Preljevanje je složen i nelinearan fenomen, slučajan u vremenu i prostoru, te ovisan o geometrijsko-strukturnim i hidrodinamičkim čimbenicima (mirna morska raz, visina i perioda vala, nadvišenje konstrukcije itd.). Često se podcjenjuje važnost ovog fenomena zbog sporadične pojave samog događaja prelijevanja.

Karakter prelijevajućih tokova ili mlazova i opasnosti koje uzrokuju također ovisi i o geometriji strukture, o prirodi neposrednog zaleđa iza krune parapetnog zida te obliku i trajektoriji

prelijevanja. Na primjer, uzdizanje tla iza tijela zida može omogućiti vidljivost nadolazećeg vala i usporiti preplavne tokove. Nasuprot tome, obrambena konstrukcija koja je znatno uzdignuta iznad branjenog područja može opstruirati vidljivost nadolazećih valova, a tokovi nakon prelijevanja mogu povećati brzinu niz stražnju konturu iste. Posebne opasnosti uzrokovane prelijevanjem stoga ovise o lokalnoj topografiji i konstrukciji kao i o značajkama izravnih prelijevanja.

Složenost u procjeni prelijevanja upravo je razlog postojanja višestrukog pristupa za samu procjenu intenziteta prelijevanja: numeričko modeliranje, empirijske metode, neuronske mreže, te 2D i 3D eksperimenti na fizikalim modelima.

Empirijske metode su pojednostavljeni prikazi složene fizike procesa, uobičajeno prikazani u bezdimenzionalnoj formi koja povezuje vremenski usrednjeni intenzitet prelijevanja s glavnim čimbenicima koji karakteriziraju fenomen. Ovaj pristup općenito se oslanja na prilagodbu empirijskih izraza rezultatima laboratorijskih ispitivanja ili mjerenjima na prototipu u prirodi. Nekoliko je autora kvantificiralo vremenski usrednjeni intenzitet prelijevanja kao funkciju glavnih geometrijskih i hidrauličkih parametara po izrazu:

$$q = a \frac{-b \times R_c \times \sqrt{g \times H_s^3}}{H_s}$$

gdje su a i b koeficijenti empirijskog modela a  $R_c$  (eng: freebord) vertikalna udaljenost između mirne razi i vrha lukobrana ili parapetnog zida.

- a = 0.2 i b = -4.3 prema Franco et al., 1994 ;
- a = 0.05 i b = -2.78 prema Allsop, 1995 ;
- a = 0.082 i b = -3 prema EM 1110-2-1100,

U radu Goda (2000) dani su empirijski izrazi za proračun intenziteta prelijevanja kao i pripadni nomogrami za procjenu rate prelijevanja preko vertikalnog zida sastavljeni na bazi laboratorijskih testova na nepravilnim valovima te proračuna valnih deformacija.

$$q = \frac{1}{t_0} \sum_{i=1}^{N_0} Q(H_i, T_i)$$

gdje je:

- $t_0 = \sum_{i=1}^{N_0} T_i$  – trajanje pojedinog naleta vala
- $Q(H_i, T_i)$  – količina prelijevanja pojedinog vala
- $N_0$  – ukupan broj valova
- $H_i, T_i$  – visina i period i-tog individualnog vala

Ovaj izraz nudi mogućnost izračuna inteziteta prelijevanja samo u slučaju provedenih laboratorijskih ispitivanja na nepravilnim valovima ili provedbom mjerenja na terenu na već postojećim parapetnim zidovima. No kada postoje laboratorijski podaci o intezitetu prelijevanja

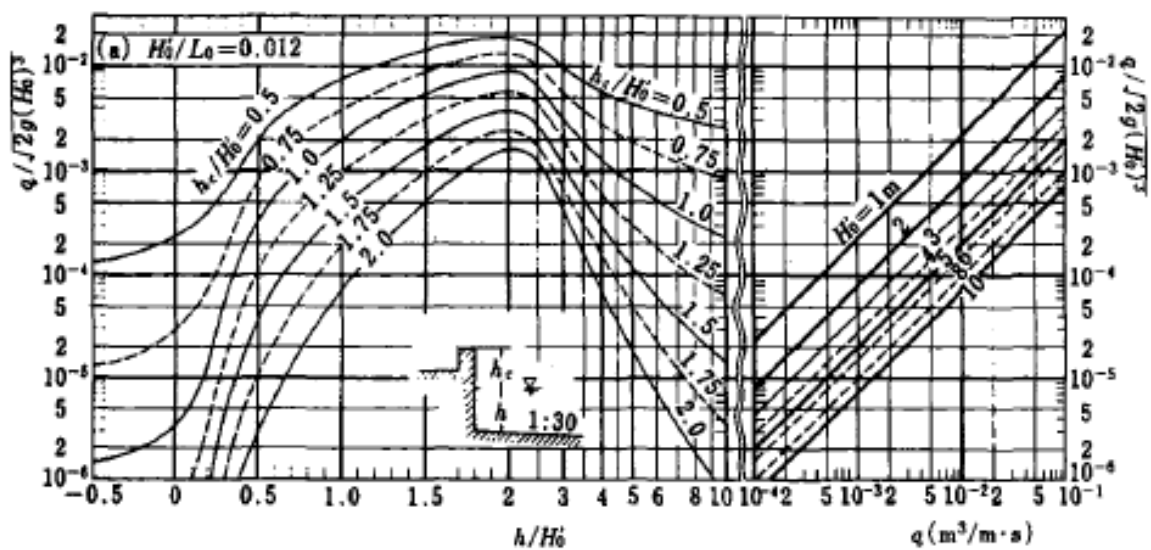
pravilnih valova s različitim kombinacijama visina i perioda, približan intezitet prelijevanja može se odrediti pomoću izraza:

$$q = \frac{1}{t_0} \sum_{t=1}^{N_0} T_i \times q_0(H_i, T_i)$$

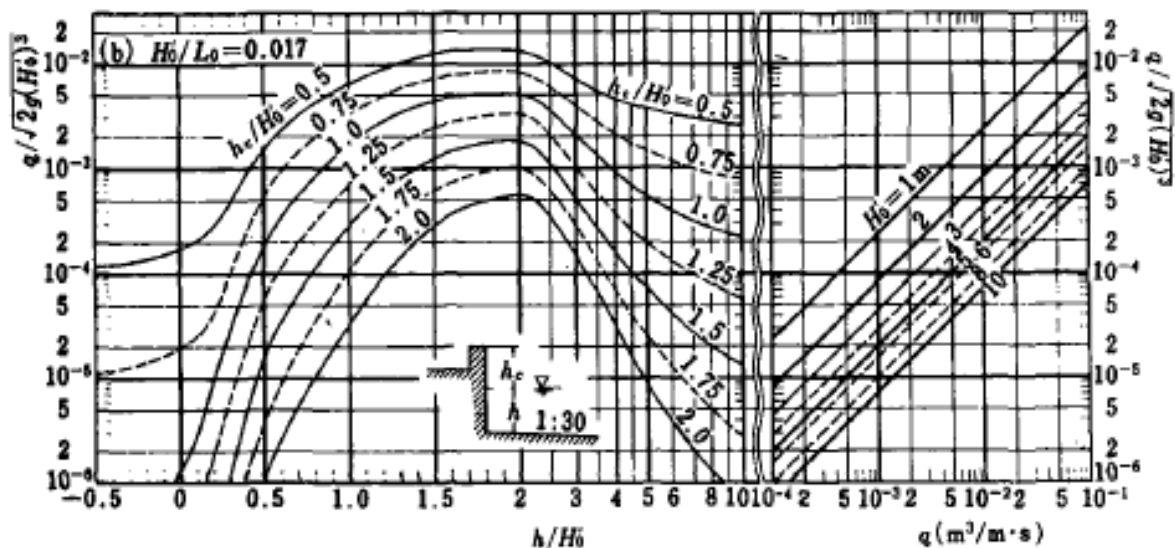
gdje je:

- $q_0(H_i, T_i)$  – intezitet prelijevanja dobiven temeljem ispitivanja na pravilnim valovima

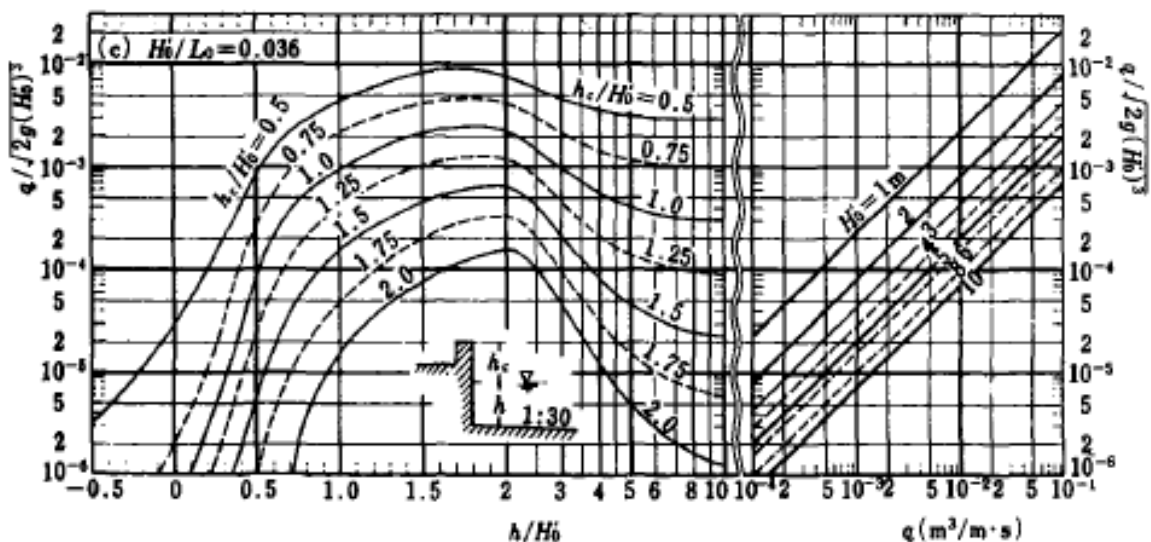
U nastavku su priloženi nomogrami za procjenu inteziteta prelijevanja na poznatom nagibu terena neposredno ispred vertikalnog lukobrana gdje  $H_0'$  označava ekvivalentnu visinu dubokovodnog vala,  $h$  – dubinu neposredno ispred lukobrana,  $h_c$  – nadvišenje krune zida iznad mirne razine mora te  $g$  – gravitacijsko ubrzanje.



Sl. 21 Nomogram za procjenu inteziteta prelijevanja po Godi na vetrikalnom nagibu terena 1/30 te za omjer  $H_0'/L_0 = 0.012$



Sl. 22 Nomogram za procjenu inteziteta prelijevanja po Godi na vetrikalnom nagibu terena 1/30 te za omjer  $H_0/L_0 = 0.017$

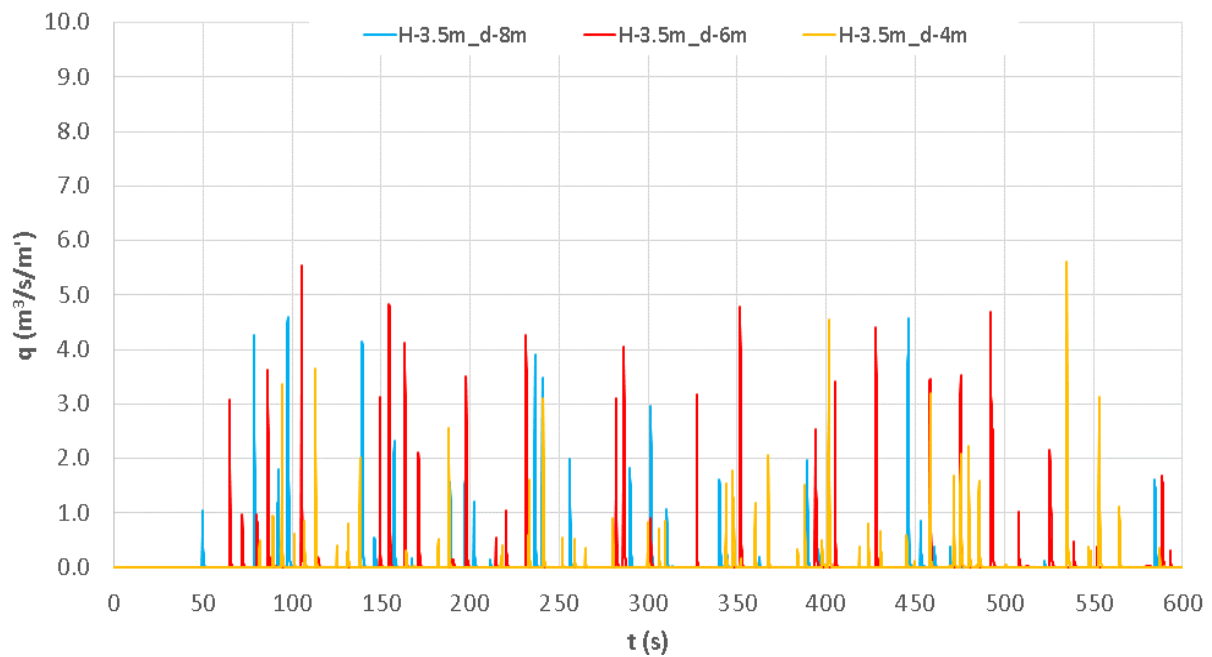


Sl. 23 Nomogram za procjenu inteziteta prelijevanja po Godi na vetrikalnom nagibu terena 1/30 te za omjer  $H_0/L_0 = 0.036$

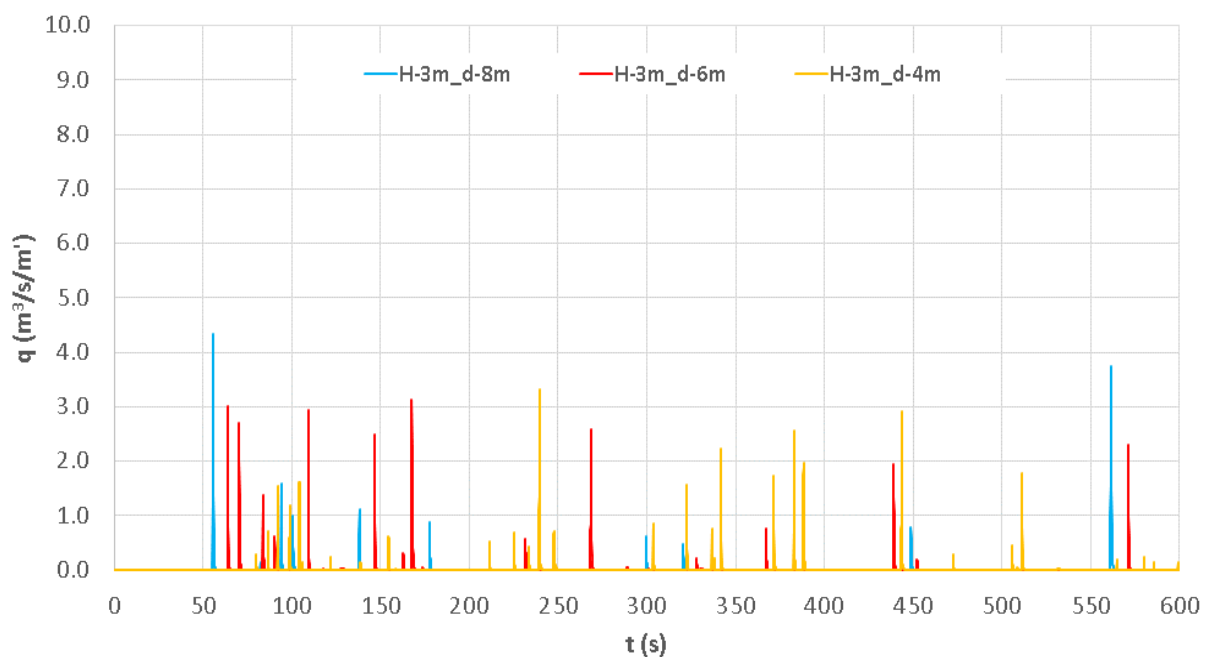
U svim empirijskim izrazima i nomogramima pretpostavljeno je da se parapetni zid postavlja na prednjoj strani lukobrana. Navedeni empirijski izrazi korišteni su za usporedbu sa modelskim (numeričkim) proračunskim vrijednostima prelijevanja pri istim geometrijskim uvjetima konstrukcije (parapetni zid smješten na prednjoj strani lukobrana).

Obzirom da ne postoje empirijski izrazi za procjenu inteziteta prelijevanja u slučaju kada je parapetni zid izmješten prema sredini lukobrana, u sklopu ovog rada provedene su i numeričke

simulacije prelijevanja za takve uvjete geometrije konstrukcije. Na slikama 24-27 prikazana je dinamika prelijevanja po metru duljine konstrukcije za spektralne valove.

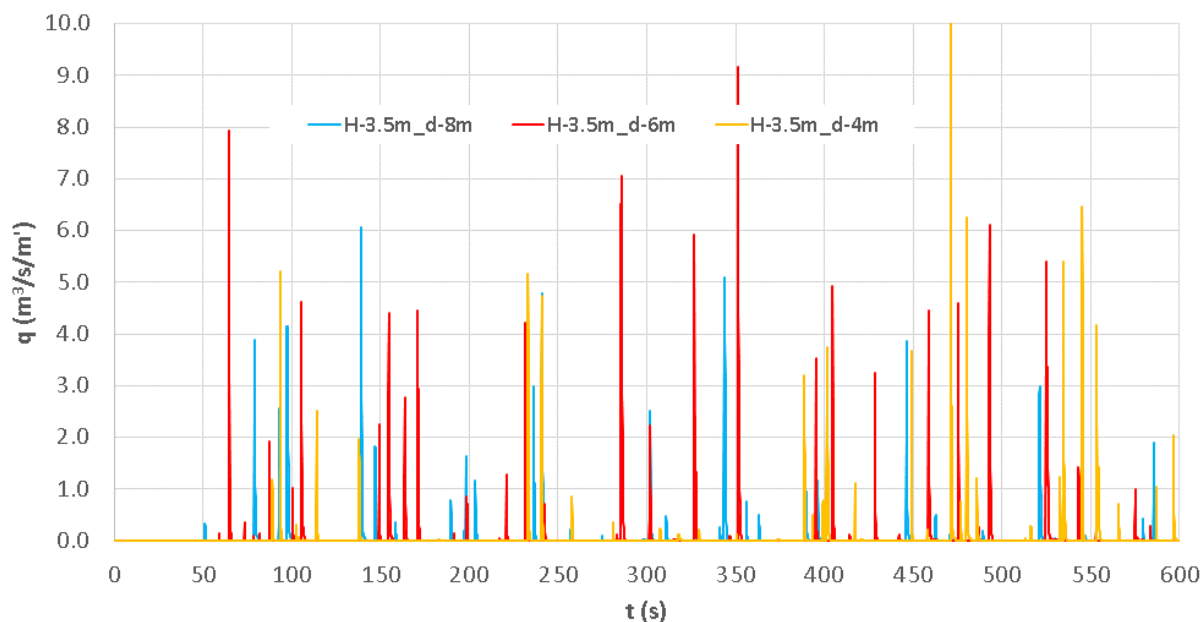


Sl. 24 Dinamika prelijevanja po  $m'$  konstrukcije lukobrana (analize 1,3,5 □  $H_s = 3.5\text{m}$  ; parapetni zid na vanjskoj konturi lukobrana)

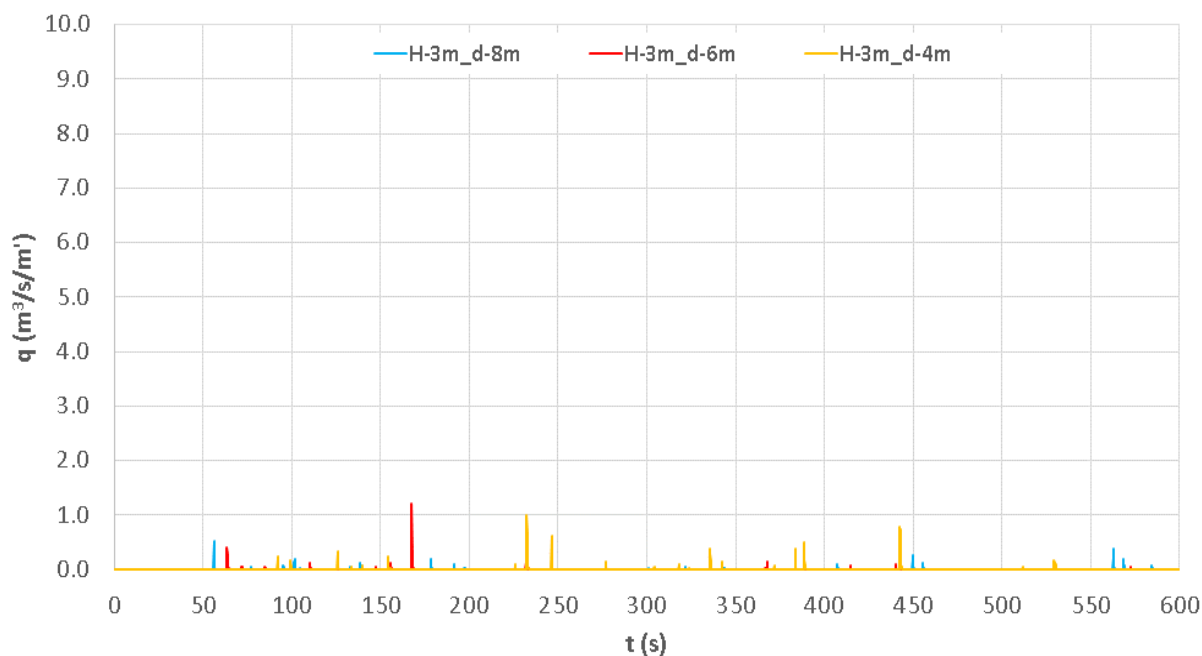


Sl. 25 Dinamika prelijevanja po  $m'$  konstrukcije lukobrana (analize 2,4,6 □  $H_s = 3.0\text{m}$  ; parapetni zid na vanjskoj konturi lukobrana)



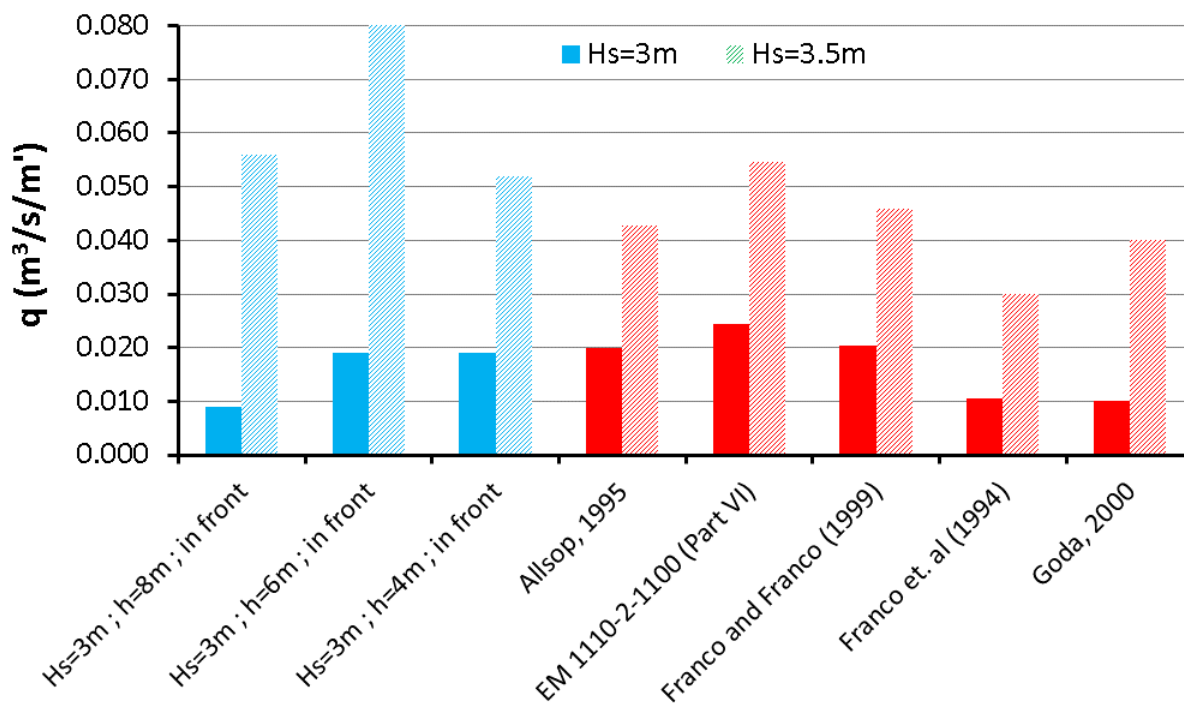


Sl. 26 Dinamika preljevanja po m' konstrukcije lukobrana (analize 7,9,11 □  $H_s = 3.5m$  ; parapetni zid uvučen za 3m)



Sl. 27 Dinamika preljevanja po m' konstrukcije lukobrana (analize 8,10,12 □  $H_s = 3.0m$  ; parapetni zid uvučen za 3 m)

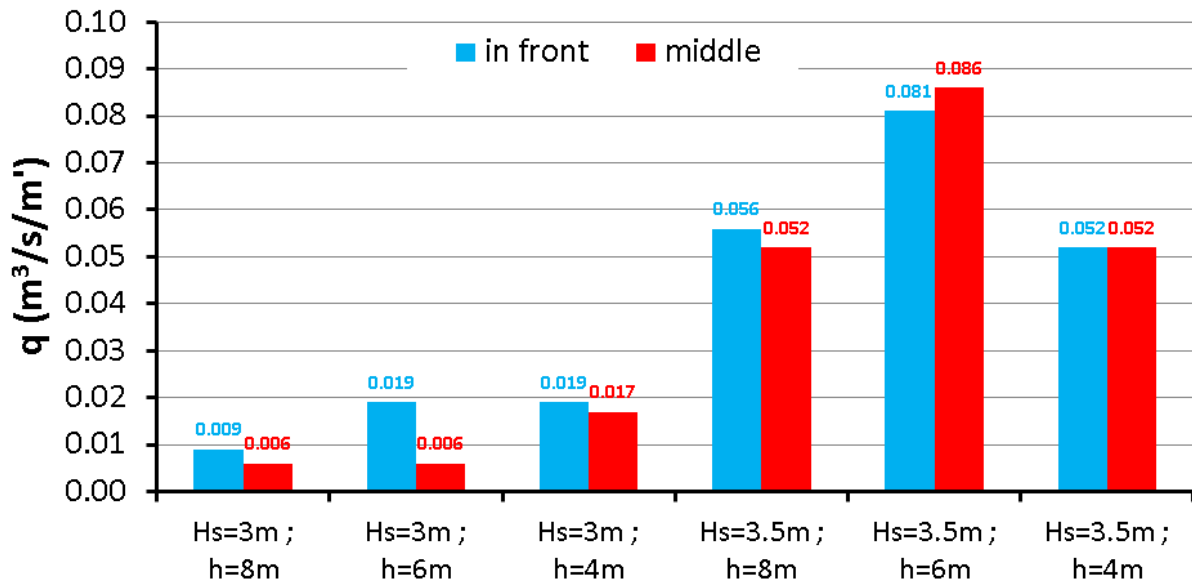
Usporedba intenziteta preljevanja ( $q - m^3/s/m'$ ) dobivenog numeričkim modelom i primjenom empirijskih obrazaca (Allsop, 1995. ; EM 1110-2-1100 (Part VI) ; Franco i Franco (1999.) ; Franco i sur. (1994.) ; Goda (2000.) prikazana je na slici 28.



Sl. 28 Usporedba intenziteta prelijevanja dobivenog numeričkim modelom i primjenom empirijskih obrazaca (numerički rezultati samo za slučaj parapetnog zida postavljenog na vanjskoj strani lukobrana)

Srednje vrijednosti prelijevanja iz rezultata numeričkih simulacija iznosi  $0.016 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$  za  $H_s = 3 \text{ m}$ , dok je srednja vrijednosti prelijevanja temeljem empirijskih izraza  $0.017 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$ . Nadalje, srednja vrijednosti prelijevanja iz rezultata numeričkih simulacija iznosi  $0.063 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$  za  $H_s = 3.5\text{m}$ , dok je srednja vrijednosti prelijevanja temeljem empirijskih izraza  $0.043 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$ . Ovi rezultati upućuju na činjenicu da numerički model generalno precjenjuje količinu prelijevanja preko krune parapetnog zida te da su stvarne vrijednosti preciznije procijenjene pomoću empirijskih izraza.

Odmicanjem parapetnog zida od ruba za  $3 \text{ m}$  mijenjaju se prethodno navedeni intenziteti prelijevanja kako je prikazano na slici 29. Usrednjeno smanjenje prelijevanja pri izvedbi parapetnog zida sa pomakom od  $3 \text{ m}$  prema sredini lukobrana iznosi oko  $20 \%$  što je značajna količina. Intenzitet prelijevanja uvelike ovisi o dubini na kojoj je izveden lukobran, a maksimalno prelijevanje dobiveno je kod lukobrana postavljenog na dubini  $6 \text{ m}$ . To možemo pripisati već opisanoj pojavi zračnog mjehura te generiranju iznimno velikih impulsa sile koji izbacuju vodu preko krune parapetnog zida.



Sl. 29 Usporedba intenziteta prelijevanja za parapetni zid na prednjoj strani lukobrana (zid ispred) i sa pomakom od 3m (zid sredina)

Nadalje, izračunati su volumeni prelijevanja za zadano razoblje obuhvaćeno numeričkim modelom za spektralne valove visina  $H_s = 3$  m i  $H_s = 3.5$  m te za dubine mora neposredno ispred lukobrana od 4, 6 i 8 metara. Volumen je prikazan u vrijednosti po metru duljine parapetnog zida, a rezultati su priloženi u tablici:

Tablica 5 Vrijednosti intenziteta i volumena prelijevanja za parapetni zid izveden na rubu i na sredini vertikalnog lukobrana uzrokovanog naletom spektralnih valova visina  $H_s = 3$  m i  $H_s = 3.5$  m

Parapetni zid na rubu							Usporedba			
h	Hs = 3 m			Hs = 3.5 m			Hs = 3 m			
	q	t	V	q	t	V	$\Delta q$	$\Delta V$	$\frac{\Delta q}{q_{rub}} \times 100\%$	$\frac{\Delta V}{V_{rub}} \times 100\%$
[m]	[m <sup>3</sup> /s/m']	[s]	[m <sup>3</sup> /m']	[m <sup>3</sup> /s/m']	[s]	[m <sup>3</sup> /m']	[m <sup>3</sup> /s/m']	[m <sup>3</sup> /m']	[%]	[%]
8	0.009	600	5.4	0.056	600	33.6	0.003	1.8	33.3	33.3
6	0.019	600	11.4	0.081	600	48.6	0.013	7.8	68.4	68.4
4	0.019	600	11.4	0.052	600	31.2	0.002	1.2	10.5	10.5
Parapetni zid na sredini							Hs = 3.5 m			
8	0.006	600	3.6	0.052	600	31.2	0.004	2.4	7.1	7.1
6	0.006	600	3.6	0.086	600	51.6	-0.005	-3	-6.2	-6.2
4	0.017	600	10.2	0.052	600	31.2	0	0	0.0	0.0

Dana je i usporedba rezultata intenziteta i volumena prelijevanja za parapetni zid izveden na sredini vertikalnog lukobrana u odnosu na vrijednosti kada je parapetni zid izveden na rubu. Kao što je već navedeno prelijevanje generalno doseže manje vrijednosti za slučaj kada je zid postavljen na sredinu lukobrana osim za val visine  $H_s = 3.5$  m kada je lukobran izveden na dubini od 6 m što se može pripisati velikim iznosima sila tlaka.

### 3.4. Rezultati numeričkih simulacija i empirijskih modela

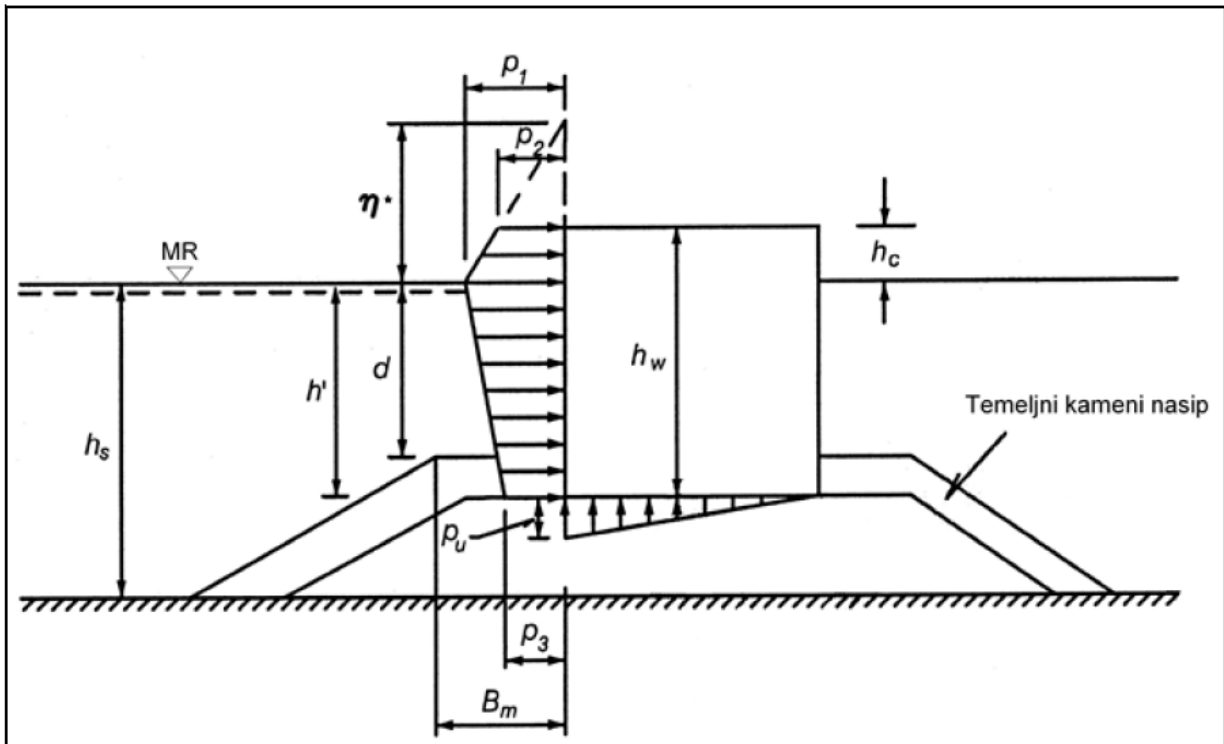
Parapetni zid analiziran je u dvije konfiguracije, u prvoj sa izvedbom na vanjskoj strani lukobrana, te u drugoj sa izmicanjem na sredinu lukobrana. Širina lukobrana je 6 m, a širina parapetnog zida je 1.2 m. Praćena je dinamika tlakova na 14 pozicija uzduž vanjske konture parapetnog zida te dinamika preljevanja preko njega u vremenskoj rezoluciji 0.1 s.

Rezultati provedenih simulacija pokazali su sljedeće:

- maksimalna sila valova na parapetni zid je gotovo četverostruko (prosječno 3.8 za spektralne valove i 3.7 za monokromatske valove) veća ukoliko se parapetni zid izvede na sredini lukobrana u usporedbi sa izvedbom parapetnog zida na početku konstrukcije;
- maksimalni registrirani tlak pri spektralnim i monokromatskim valovima pojavljuje se na spoju pokrovne ploče lukobrana i parapetnog zida;
- intenziteti prelijevanja proračunati numeričkim modelom ( $q = 0.016 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$ ) su vrlo bliski vrijednostima dobivenim sa empirijskim obrascima ( $q = 0.017 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$ ) u slučaju parapetnog zida na prednjoj strani lukobrana u uvjetima valovanja  $H_s = 3 \text{ m}$  i  $T_p = 6.3 \text{ s}$ , dok u slučaju  $H_s = 3.5 \text{ m}$  i  $T_p = 6.9 \text{ s}$  rezultati numeričkih simulacija daju veće vrijednosti preljevanja za 46%;
- ukoliko je parapetni zid postavljen na sredini konstrukcije preljevanje je manje za 20% (prosječno za sve simulacije) od slučaja kada se parapetni zid na početku lukobrana;
- rezultati empirijskih obrazaca ne daju uvid u razliku intenziteta prelijevanja u ovisnosti o poziciji parapetnog zida i utjecaju dubine na kojoj je izveden lukobran, te je stoga potrebno provesti numeričke simulacije ili ispitivanje na fizikalnom modelu.

#### 4. Proračun opterećenja po Godinoj metodi

Godina metoda iz 1974. godine u širokoj je primjeni danas zbog svoje jednostavnosti. Ovo je eksperimentalna metoda temeljena na laboratorijskim pokusima, a pokriva slučajeve totalne i parcijalne refleksije. Metoda se odnosi na realne valove, no proračun sile tlaka vala se provodi za pojedinačni val čija je reprezentativna valna visina  $H_{proj} = 1,8H_s$ . Definijska skica za proračun Godinom metodom priložena je na slici 31:



Sl. 30 Definijska skica za proračun dinamičkog tlaka vala na vertikalni zid po Godi

Proračun tlakova na lukobran i parapetni zid uzrokovanih udarima valova vrši se prema sljedećim izrazima:

$$\eta^* = 0.75 \times (1 + \cos\alpha) \times H_{proj}$$

gdje je:

- $\eta^*$  [m] - doseg vala na zidu iznad mirne razine mora
- $\rho_m$  [kg/m<sup>3</sup>] - gustoća morske vode ( $\rho_m = 1025$  [kg/m<sup>3</sup>])
- $\alpha$  [°] - tlocrtni kut između smjera rasprostiranja valova i normale na trasu zida,

$$p_1 = \frac{1}{2} \times (1 + \cos\alpha) \times (\lambda_1\alpha_1 + \lambda_2\alpha_2 \times \cos^2\alpha) \times \rho_m \times g \times H_{proj}$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \times \left[ \frac{4\pi \frac{h_s}{L}}{\sinh 4\pi \frac{h_s}{L}} \right]^2$$

$$\alpha_2 < od \left\{ \frac{\frac{1}{3} \times \left(1 - \frac{d}{d_b}\right) \left(\frac{H_{proj}}{d}\right)^2}{\frac{2d}{H_{proj}}} \right\}$$

gdje je:

- $p_1$  [N/m<sup>2</sup>] - dinamički tlak na mirnoj površini mora
- $h_s$  [m] - dubina morskog dna ispred zida
- $d$  [m] - dubina mora neposredno ispred lukobrana
- $L$  [m] - deformirana valna dužina na dubini  $d_b$
- $d_b$  [m] - dubina mora na udaljenosti  $5H_s$  ispred lica zida
- $\lambda_1, \lambda_2$  i  $\lambda_3$  faktori modifikacije ovisni o tipu konstrukcije. Za standardni vertikalni zid  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1$

$$p_2 = \left\{ \begin{array}{l} \left(1 - \frac{h_c}{\eta^*}\right) \times p_1 \dots \text{za } \eta^* > h_c \\ 0 \dots \text{za } \eta^* \leq h_c \end{array} \right\}$$

$$p_3 = \alpha_3 \times p_1$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h_s} \times \left(1 - \frac{1}{\cosh 2\pi \frac{h_s}{L}}\right)$$

gdje je:

- $p_2$  [N/m<sup>2</sup>] - dinamički tlak na razini krune zida
- $h_c$  [m] - visina krune zida iznad mirne razine mora
- $p_3$  [N/m<sup>2</sup>] - dinamički tlak na u razini nožice zida  $h'$
- $h'$  [m] - dubina nožice zida

Proračun je proveden za parapetni zid visine 2.6 metara za monokromatske i spektralne valove značajnih valnih visina  $H(H_s) = 3$  m i  $H(H_s) = 3,5$  m. Godina metoda ne prepoznaje

horizontalnu konfiguraciju lukobrana stoga su rezultati isti neovisno o tome nalazi li se parapetni zid na rubu ili na sredini. Pretpostavljeno je da val dolazi okomito na os lukobrana stoga je za kut naleta vala uzeta vrijednost 0. Kod izračuna  $H_{proj}$  za monokromatske valove visina  $H = 3$  m i  $H = 3.5$  m uzeta je vrijednost od  $H$  dok je za spektralne valove uzeta vrijednost  $H_{proj} = 1.4H_s$  za  $H_s = 3$  m te  $H_{proj} = 1.5H_s$  za spektralne valove visine  $H_s = 3.5$  m. Valne duljine  $L$  i  $L_s$  dobivene su iterativnim postupkom pomoću izraza:

$$L = \frac{g \times T^2}{2\pi} \times \tanh \frac{2\pi d}{L}$$

odnosno

$$L_s = \frac{g \times T_s^2}{2\pi} \times \tanh \frac{2\pi d}{L_s}$$

gdje su:

- $L, L_s$  – valne duljine monokromatskih i spektralnih valova
- $T, T_s$  – valni periodi monokromatskih i spektralnih valova
- $d$  – dubina mora neposredno ispred nožice lukobrana

Proračun je proveden u računalnom programu Microsoft Excel, a rezultati su dani u sljedećoj tablici.

*Tablica 6 Rezultati proračuna po Godinoj metodi*

Monokromatski valovi											Tlakovi na parapetni zid			
H	H <sub>proj</sub>	hs=d=h'	η*	L	db	α1	α2	α2	α2 odabrano	α3	hc	p1	p2	p3
[m]	[m]	[m]		[m]	[m]						[m]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
3	3	8	4.5	48.254	8.5	0.739	0.003	5.333	0.003	0.628	4	22375.99	2486.221	14048.5
3	3	6	4.5	43.416	6.5	0.799	0.006	4.000	0.006	0.714	4	24308.3	2700.922	17352.46
3	3	4	4.5	36.787	4.5	0.878	0.021	2.667	0.021	0.805	4	27113.09	3012.565	21824.04
3.5	3.5	8	5.25	54.217	8.58	0.777	0.004	4.571	0.004	0.684	4	27508.48	6549.639	18829.19
3.5	3.5	6	5.25	48.452	6.58	0.836	0.010	3.429	0.010	0.759	4	29781.42	7090.815	22596.88
3.5	3.5	4	5.25	40.78	4.58	0.909	0.032	2.286	0.032	0.836	4	33114.35	7884.37	27692.33
Spektralni valovi											Tlakovi na parapetni zid			
H <sub>s</sub>	H <sub>proj</sub>	hs=d=h'	η*	L <sub>s</sub>	db	α1	α2	α2	α2 odabrano	α3	hc	p1	p2	p3
[m]	[m]	[m]		[m]	[m]						[m]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
3	4.2	8	6.3	42.45	8.5	0.700	0.005	3.810	0.005	0.560	4	29803.08	10880.49	16688.8
3	4.2	6	6.3	38.54	6.5	0.759	0.013	2.857	0.013	0.659	4	32602.36	11902.45	21486.04
3	4.2	4	6.3	32.93	4.5	0.843	0.041	1.905	0.041	0.766	4	37310.01	13621.12	28584.18
3.5	5.25	8	7.875	47.98	8.58	0.737	0.010	3.048	0.010	0.625	4	39430.22	19402.17	24642.85
3.5	5.25	6	7.875	43.18	6.58	0.798	0.022	2.286	0.022	0.712	4	43293.6	21303.2	30804.72
3.5	5.25	4	7.875	36.60	4.58	0.876	0.073	1.524	0.073	0.803	4	50104.75	24654.72	40248.25

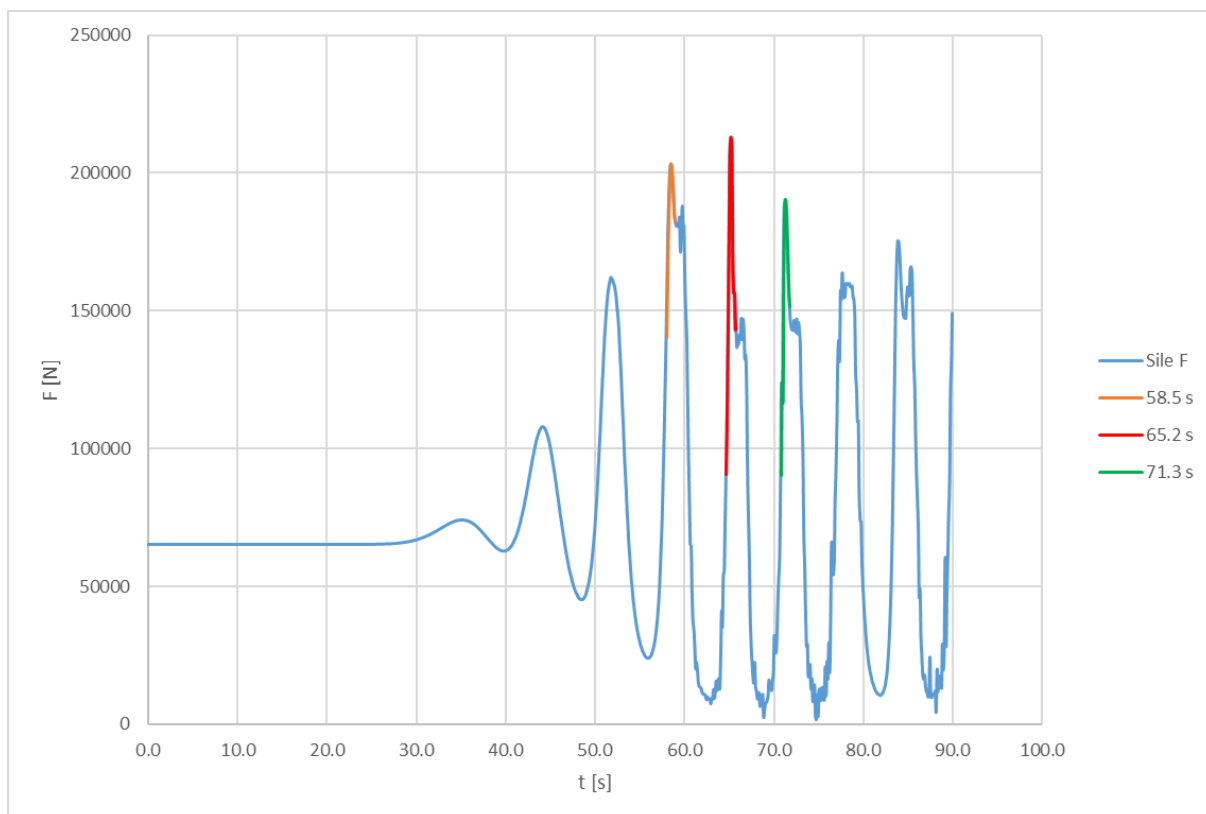
Nadalje, rezultati proračuna iz tablice 6 grafički su uspoređeni s rezultatima numeričkog modela valnog opterećenja na parapetni zid te na tijelo lukobrana što je i prikazano u nastavku. Rezultati su prikazani za lukobran postavljen na dubini od 6 metara te do dubine od 3.4 m kako je simulirano u numeričkom modelu. Kao mjerodavni uzeta su tri valna događaja u kojima je ukupna sila na parapetni zid maksimalna te je prikazan trenutak vršne sile i 0.1 sekunda prije i poslije, a radi bolje prezentnosti dijagrami su prikazani u 10 kPa.

Na slikama 32, 34, 36 i 38 prikazan je raspored sila tlaka u vremenu koje djeluju na cjelokupnu konstrukciju, a uzrokuju ih monokromatski valovi valnih visina  $H = 3$  m i  $H = 3.5$  m te valnih perioda  $T = 6.3$  s i  $T = 6.9$  s. Na slikama je vidljivo da je simulacija obustavljena nakon 90 sekundi, a to je iz razloga što je monokromatskim valovima potrebno neko vrijeme da se uspostavi pravilan režim nakon čega postaju monotoni te je procijenjeno da daljnjom simulacijom ne bi došlo do znatno različitih rezultata.

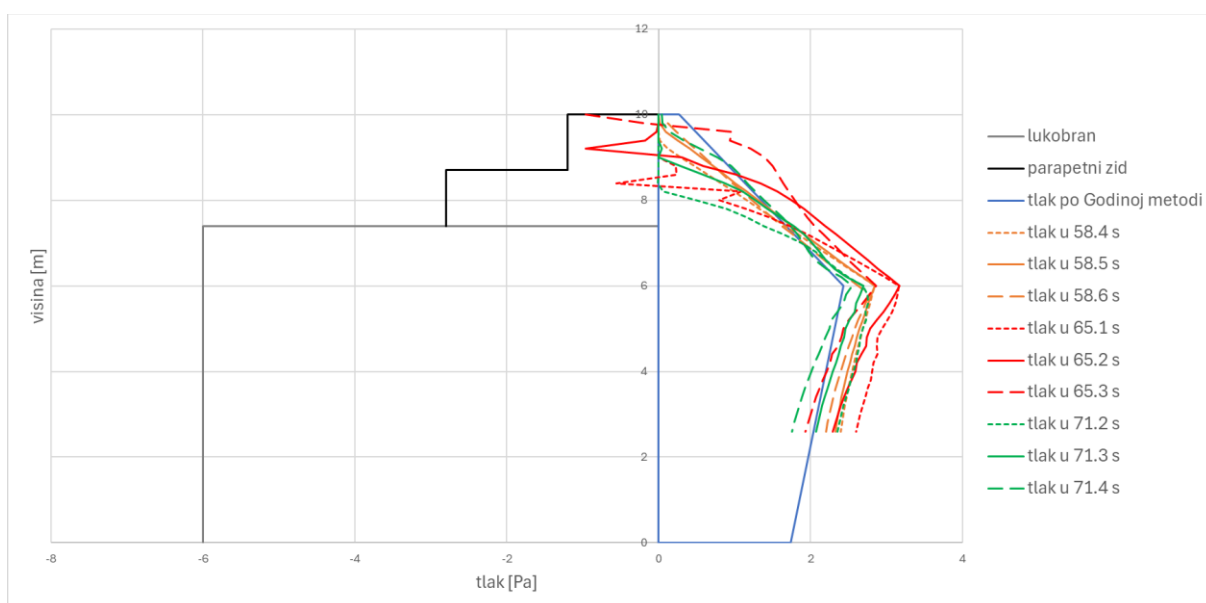
Vremenska raspodjela valnih sila spektralnih valova valnih visina  $H_s = 3$  m i  $H_s = 3.5$  m te valnih perioda  $T_p = 6.3$  s i  $T_p = 6.9$  s puno je nepravilnija te se može primijetiti da spektralni valovi dolaze na konturu parapetnog zida i lukobrana u grupama od po nekoliko pojedinačnih valova kao što je vidljivo na slikama 40, 42, 44 i 46. Oscilacije u silama tlaka događaju se znatno brže te su maksimumi dosta izraženiji nego što je to slučaj kod monokromatskih valova.

Kao i do sada, vidljivo je da su valne sile na cjelokupnu konstrukciju osjetno veće u situacijama kada je parapetni zid postavljen na sredinu lukobrana te da maksimalna opterećenja u takvim situacijama traju znatno kraće u odnosu na slučajeve kada je parapetni zid postavljen na rub. Dijagrami u nastavku prikazuju vremensku raspodjelu valnih sila na parapetni zid i lukobran kao i raspodjelu tlakova na konturu cjelokupne konstrukcije.

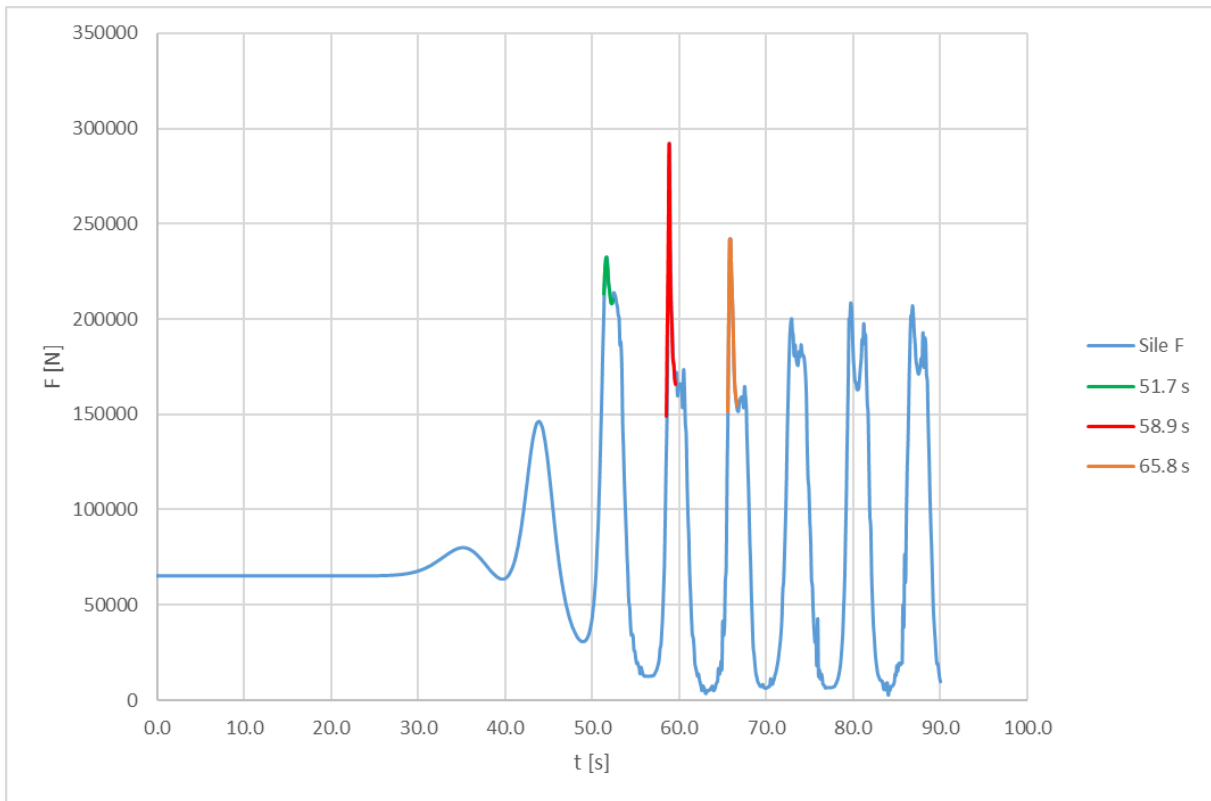




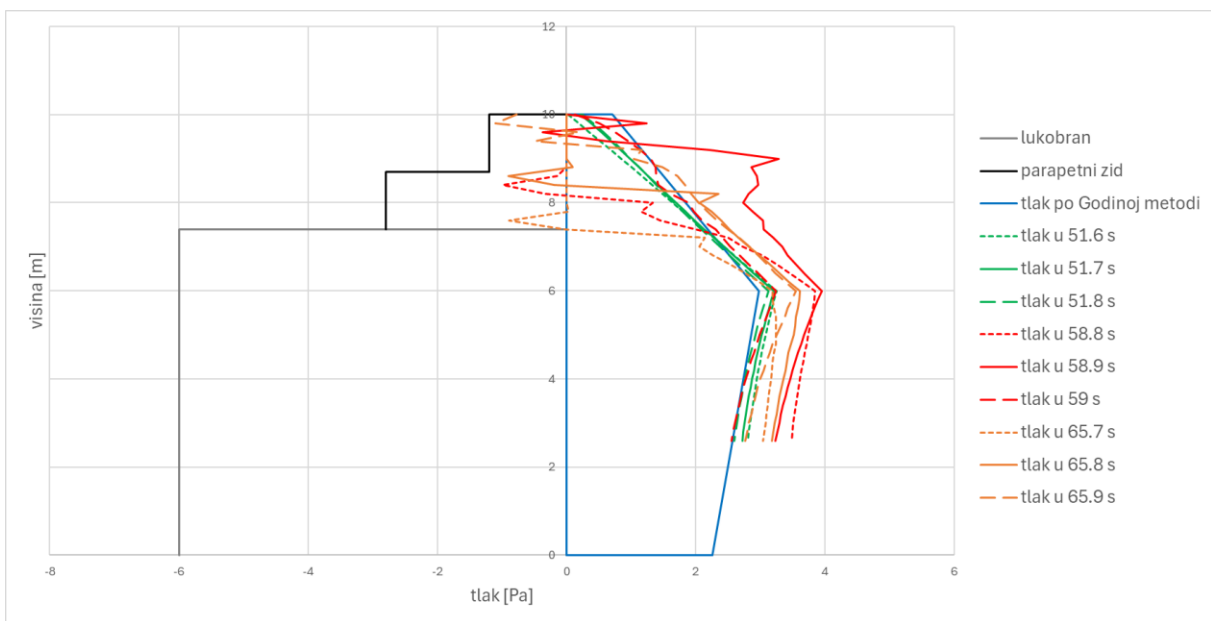
Sl. 31 Raspored sila u vremenu na lukobran i parapetni zid za monokromatski val visine  $H = 3$  m kad je parapetni zid postavljen na rub lukobrana



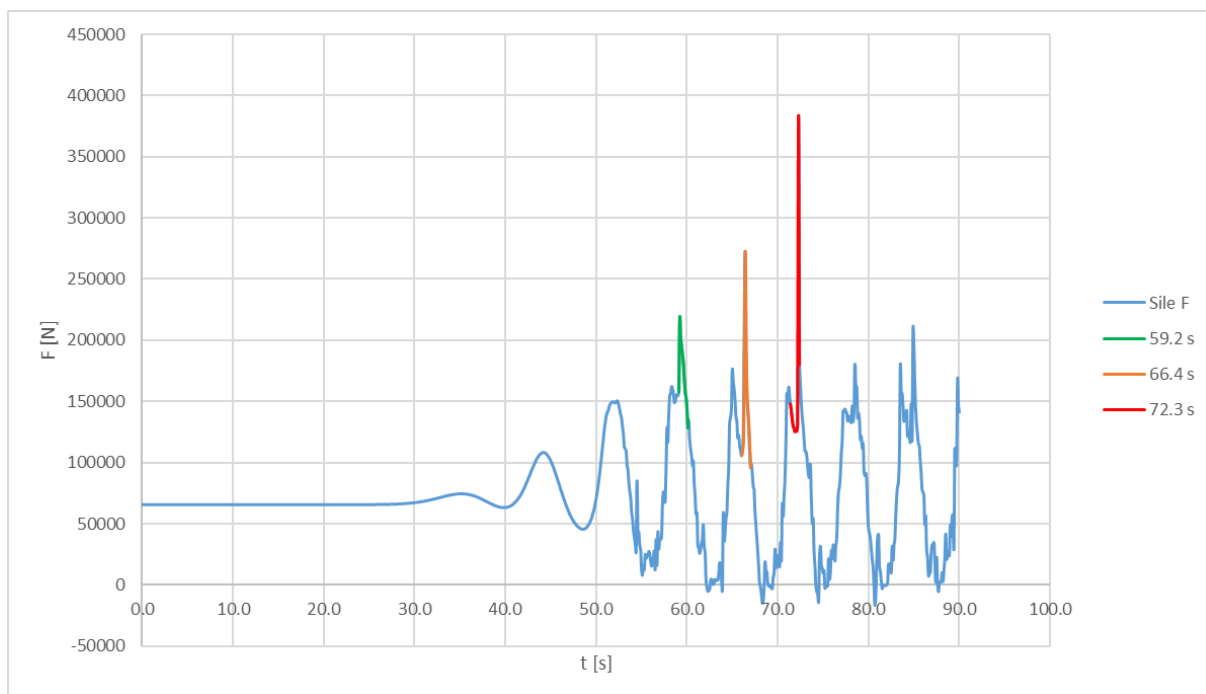
Sl. 32 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na rubu lukobrana od monokromatskih valova visine  $H = 3$  m



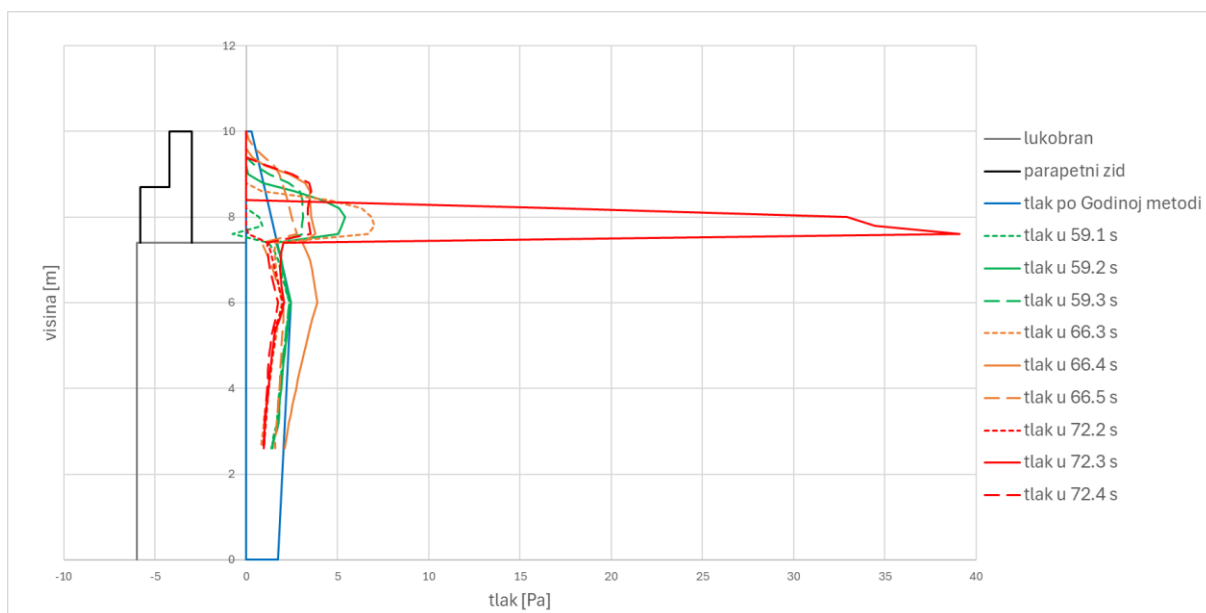
Sl. 33 Raspored sila u vremenu na lukobran i parapetni zid za monokromatski val visine  $H = 3.5$  m kad je parapetni zid postavljen na rub lukobrana



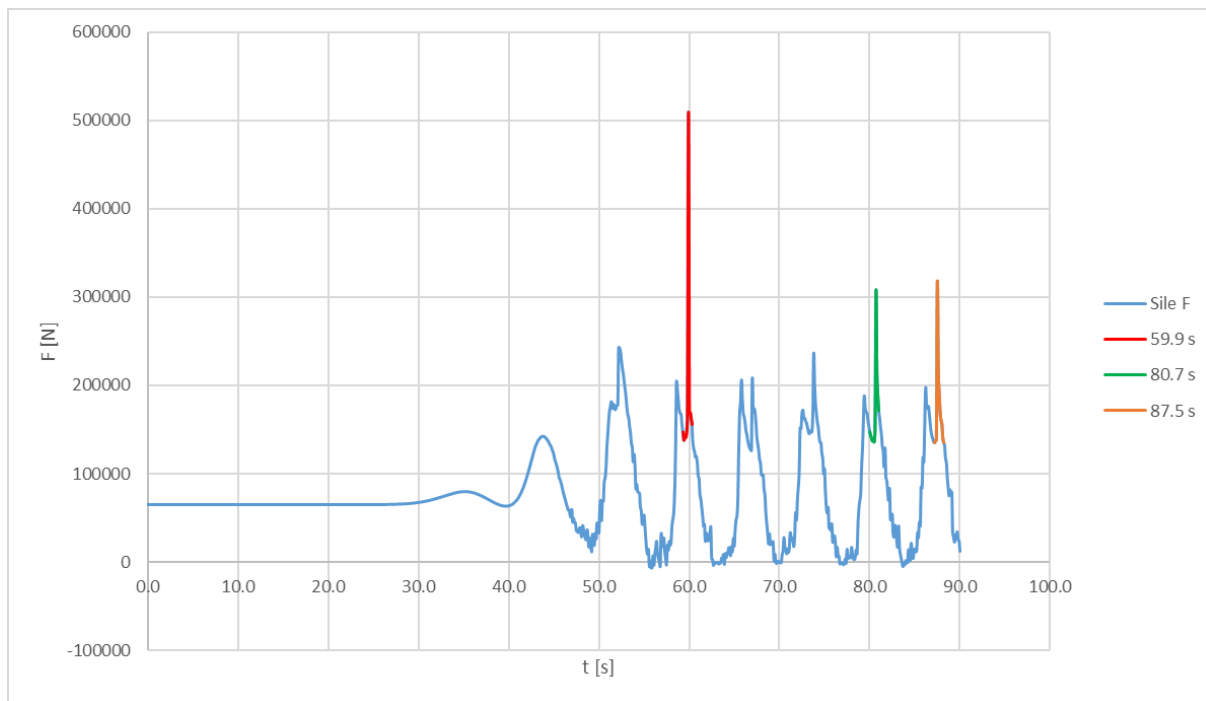
Sl. 34 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na rubu lukobrana od monokromatskih valova visine  $H = 3.5$  m



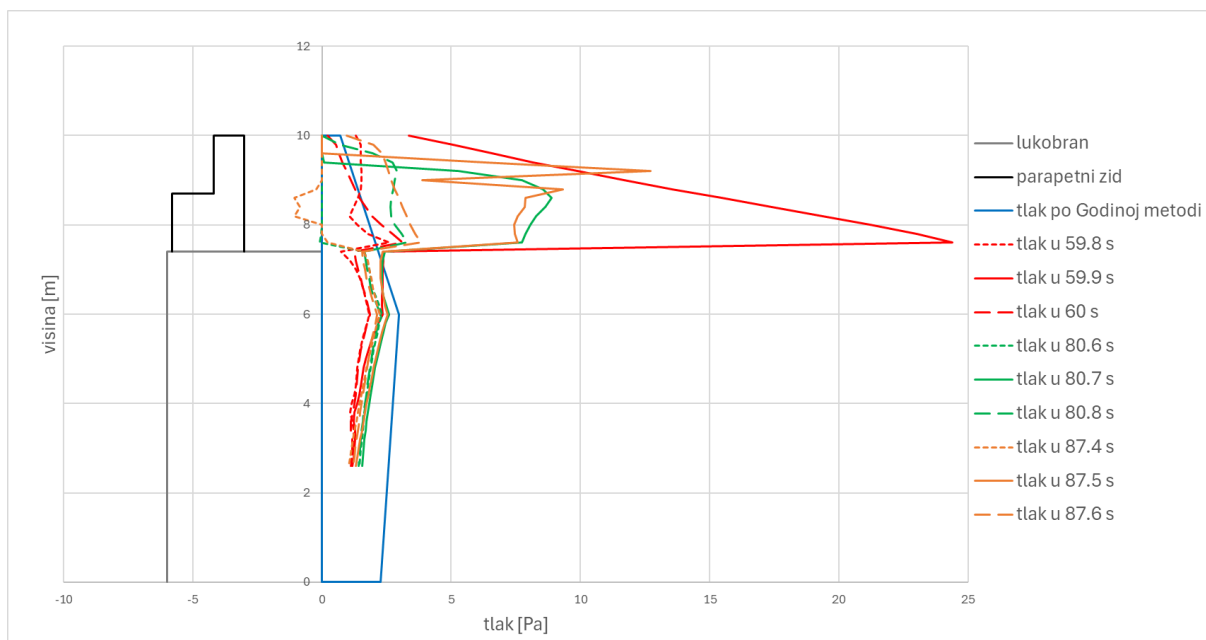
Sl. 35 Raspored sile u vremenu na lukobran i parapetni zid za monokromatski val visine  $H = 3$  m kad je parapetni zid postavljen na sredinu lukobrana



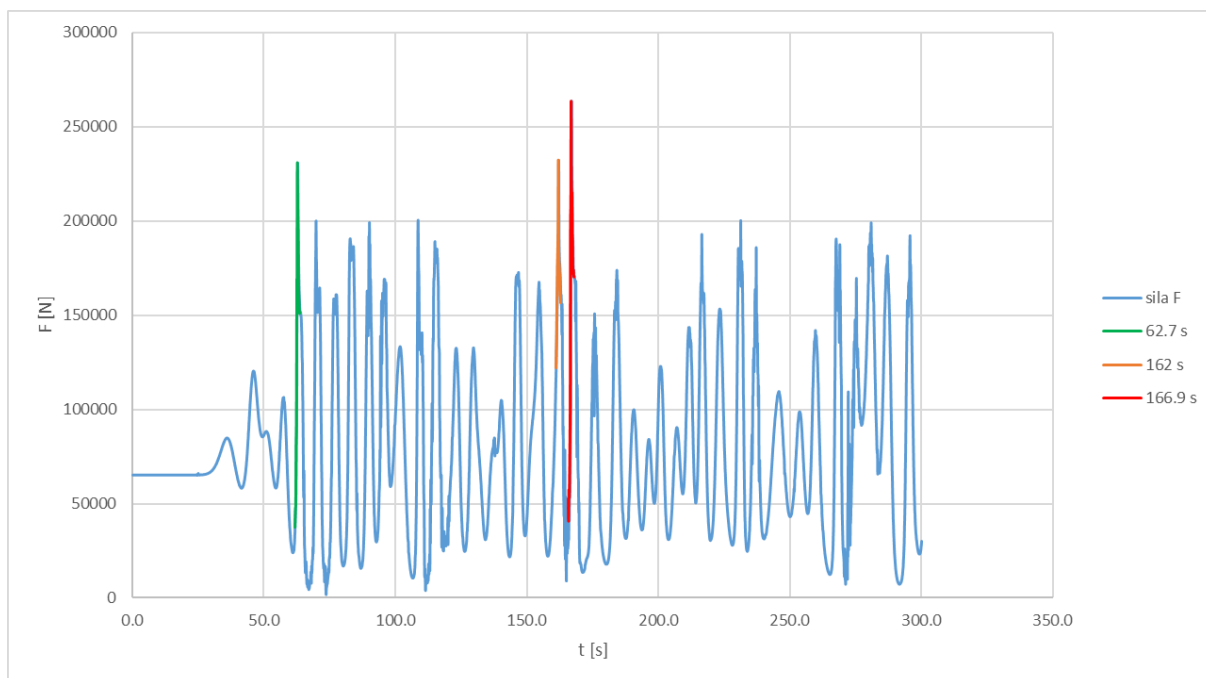
Sl. 36 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na sredinu lukobrana od monokromatskih valova visine  $H = 3$  m



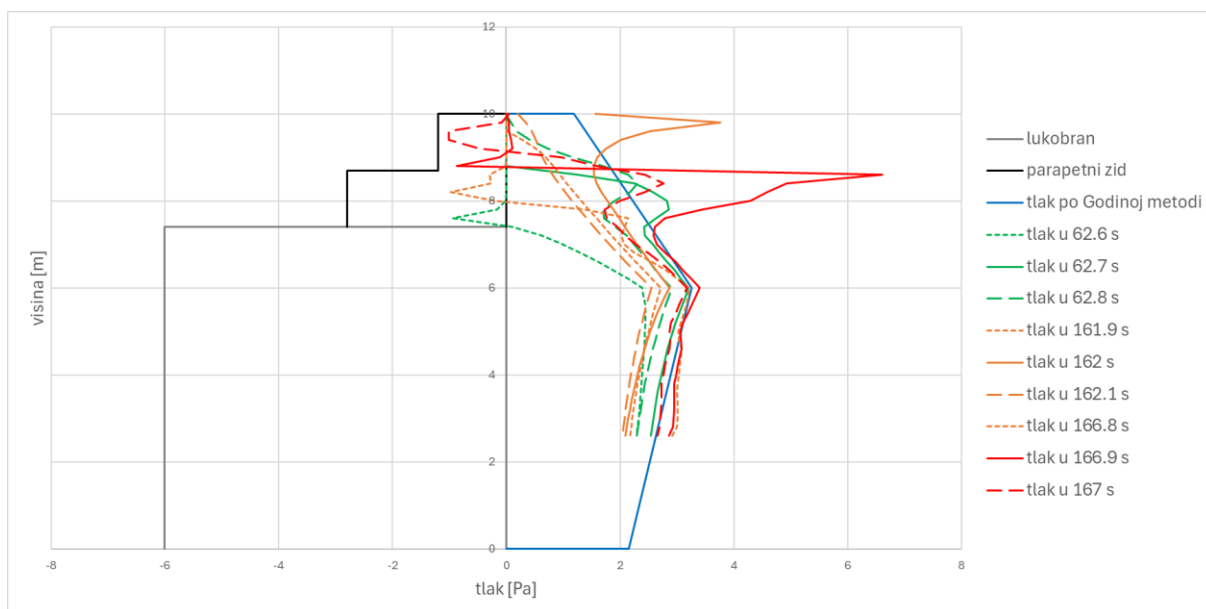
Sl. 37 Raspored sila u vremenu na lukobran i parapetni zid za monokromatski val visine  $H = 3.5$  m kad je parapetni zid postavljen na sredinu lukobrana



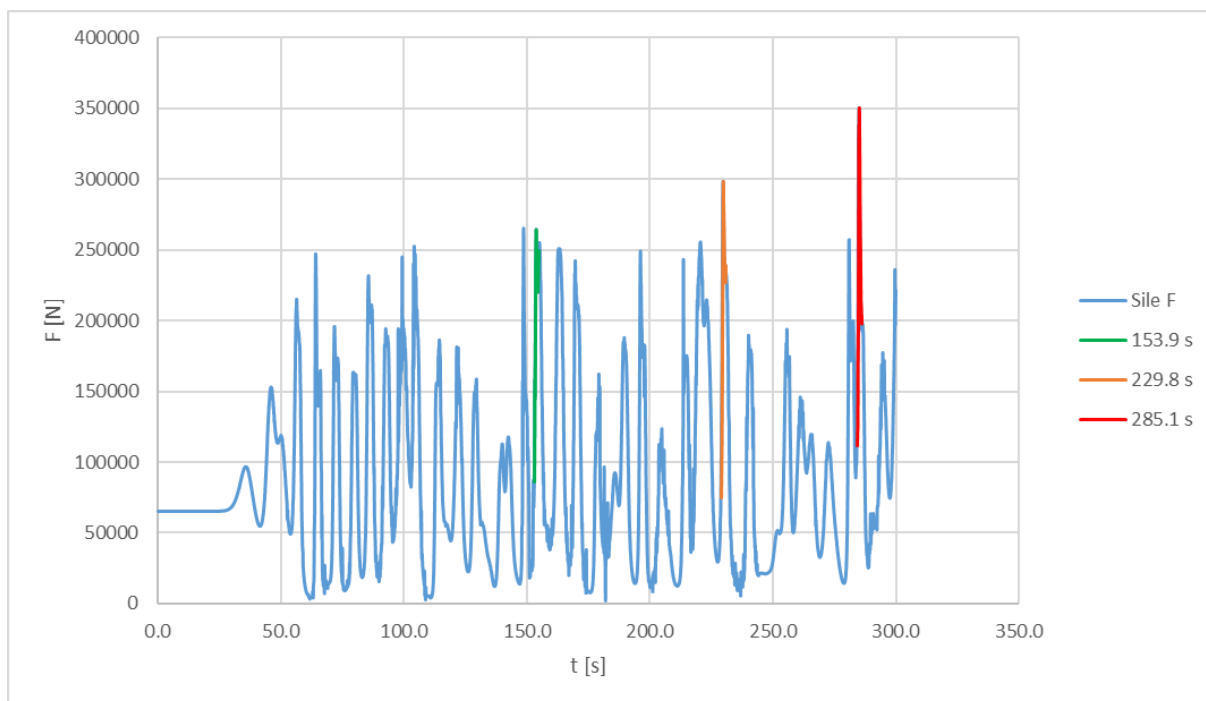
Sl. 38 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na sredinu lukobrana od monokromatskih valova visine  $H = 3.5$  m



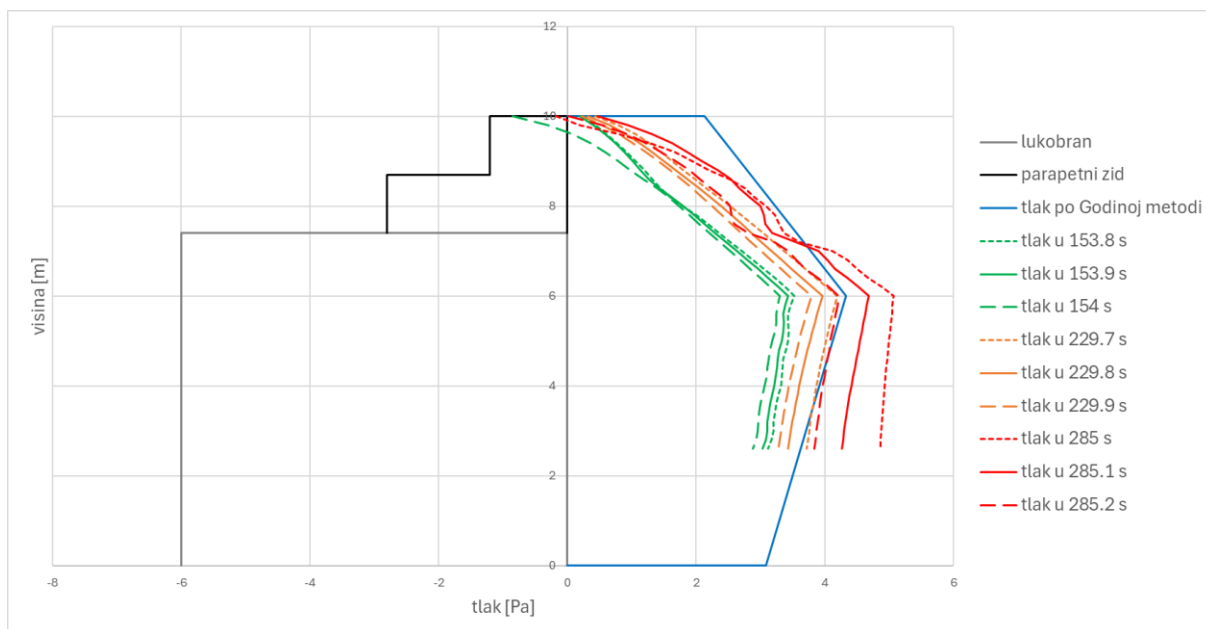
Sl. 39 Raspored sila u vremenu na lukobran i parapetni zid za spektralni val visine  $H_s=3m$  kad je parapetni zid na rubu lukobrana



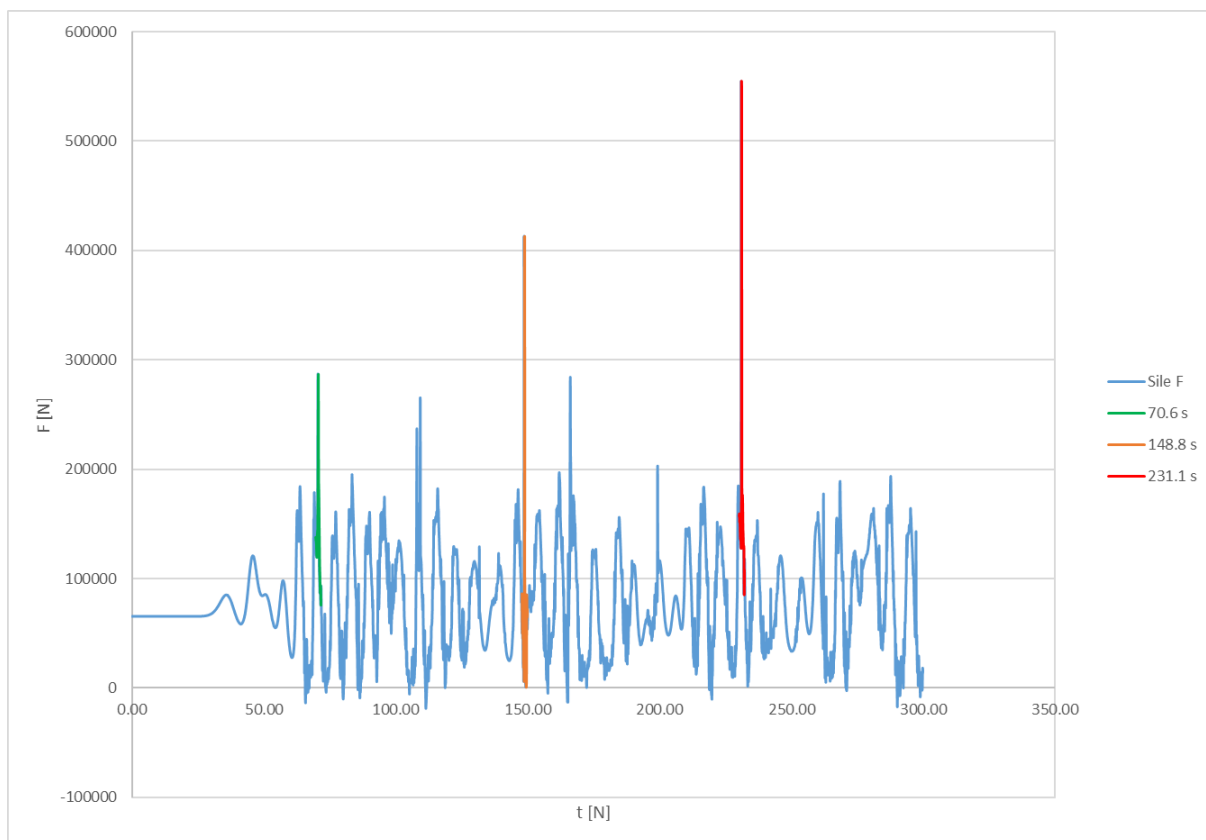
Sl. 40 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na rubu lukobrana od spektralnih valova visine  $H_s = 3 m$



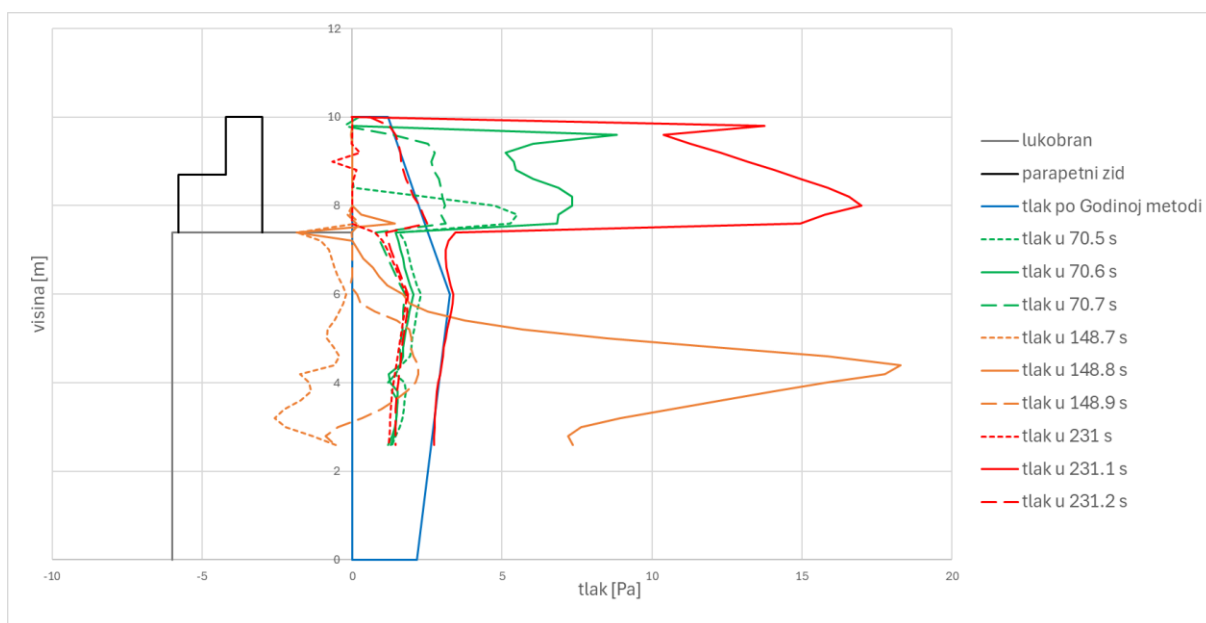
Sl. 41 Raspored sila u vremenu na lukobran i parapetni zid za spektralni val visine  $H_s=3.5\text{m}$  kad je parapetni zid na rubu lukobrana



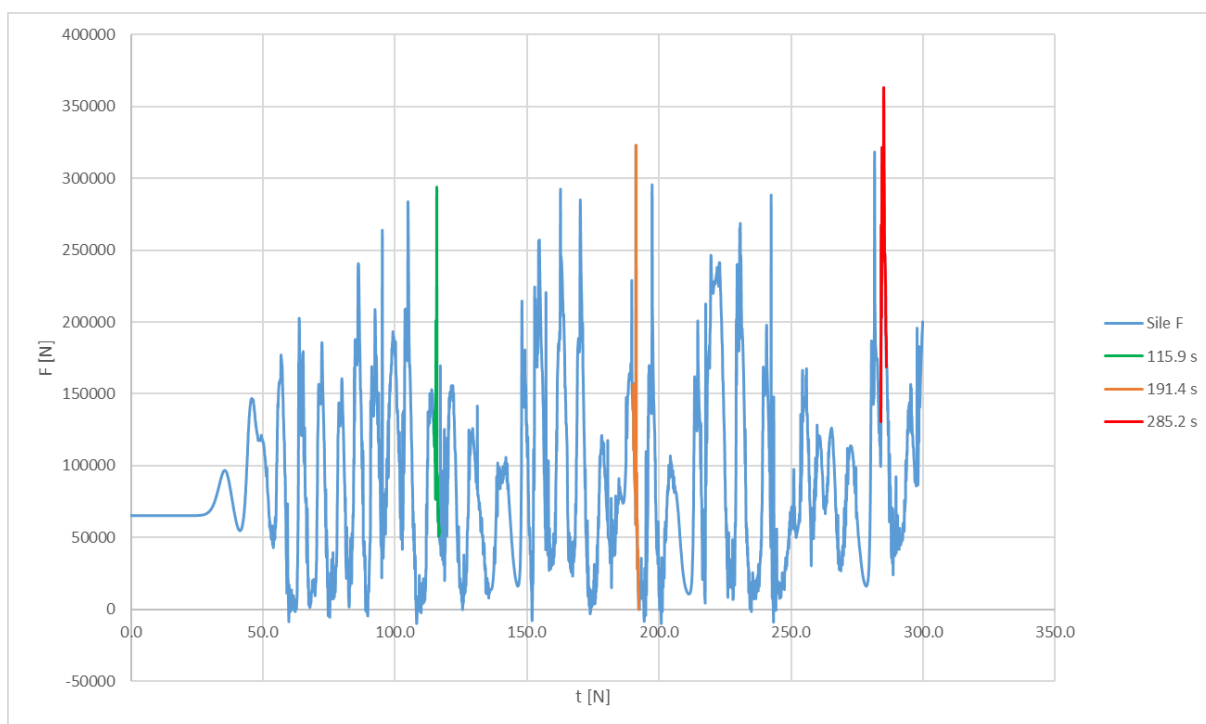
Sl. 42 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na rubu lukobrana od spektralnih valova visine  $H_s = 3,5\text{ m}$



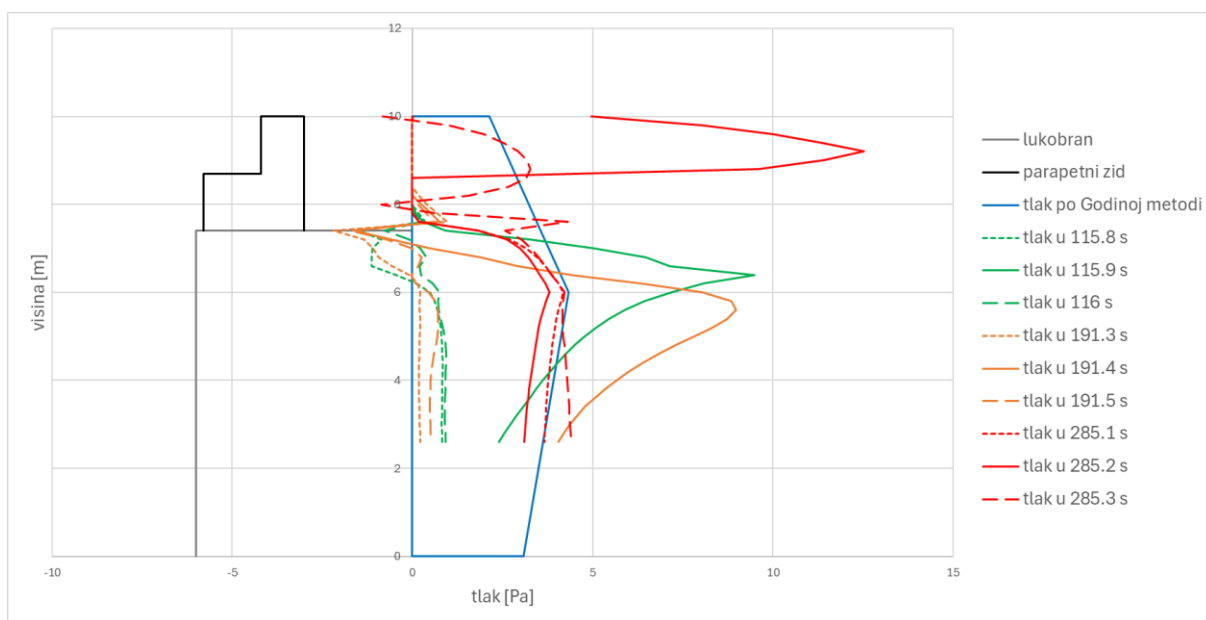
Sl. 43 Raspored sila u vremenu na lukobran i parapetni zid za spektralni val visine  $H_s=3m$  kad je parapetni zid na sredini lukobrana



Sl. 44 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na sredinu lukobrana od spektralnih valova visine  $H_s = 3 m$



Sl. 45 Raspored sila u vremenu na lukobran i parapetni zid za spektralni val visine  $H_s=3.5m$  kad je parapetni zid na sredini lukobrana

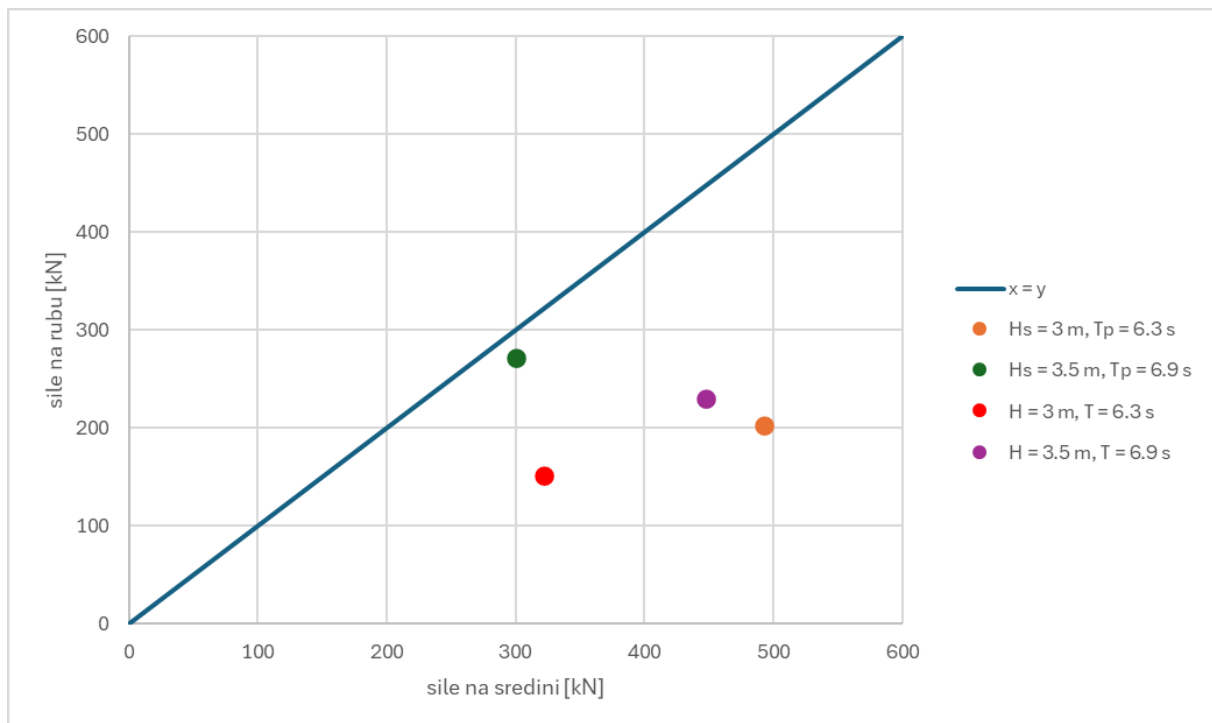


Sl. 46 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na sredinu lukobrana od spektralnih valova visine  $H_s = 3,5 m$



Kao što je vidljivo na slikama 33, 35, 41 i 43, Godina metoda poprilično precizno opisuje distribuciju tlakova po konturi parapetnog zida i lukobrana kada je zid izveden na rubu što je čini idealnim alatom za proračun zbog svoje jednostavnosti i široke primjene. Naravno, postoje oscilacije u tlakovima koje metoda nije u stanju predvidjeti te se za precizan prikaz opterećenja na parapetni zid moraju provesti laboratorijska ispitivanja. S druge strane slike 37, 39, 45 i 47 ilustriraju potpuno drukčiju situaciju, odnosno ukazuju na manjkavosti Godine metode koja, kao što je već spomenuto, nije opramljena matematičkim proračunskim alatima koji bi omogućili uzimanje u obzir horizontalne konfiguracije lukobrana i parapetnog zida. Također, Godina metoda, iako se temelji na ispitivanjima na realnim valovima, nije u stanju predviditi utjecaj zarobljenih mjehura zraka koji izazivaju značajne nepravilnosti u tlakovima kojima je opterećena konstrukcija te samim time i pripadnim silama. Tlakovi zabilježeni u numeričkom modelu provedenom za slučaj kada je parapetni zid postavljen na sredinu lukobrana su i do 10 puta veći od tlakova koji djeluju na zid postavljen na rub, također je vidljivo da se maksimalni tlakovi uglavnom (pogotovo kod monokromatskih valova) javljaju pri dnu parapetnog zida što ukazuje na djelovanje zarobljenog zračnog mjehura no bez obzira ima potencijal da naruši stabilnost konstrukcije.

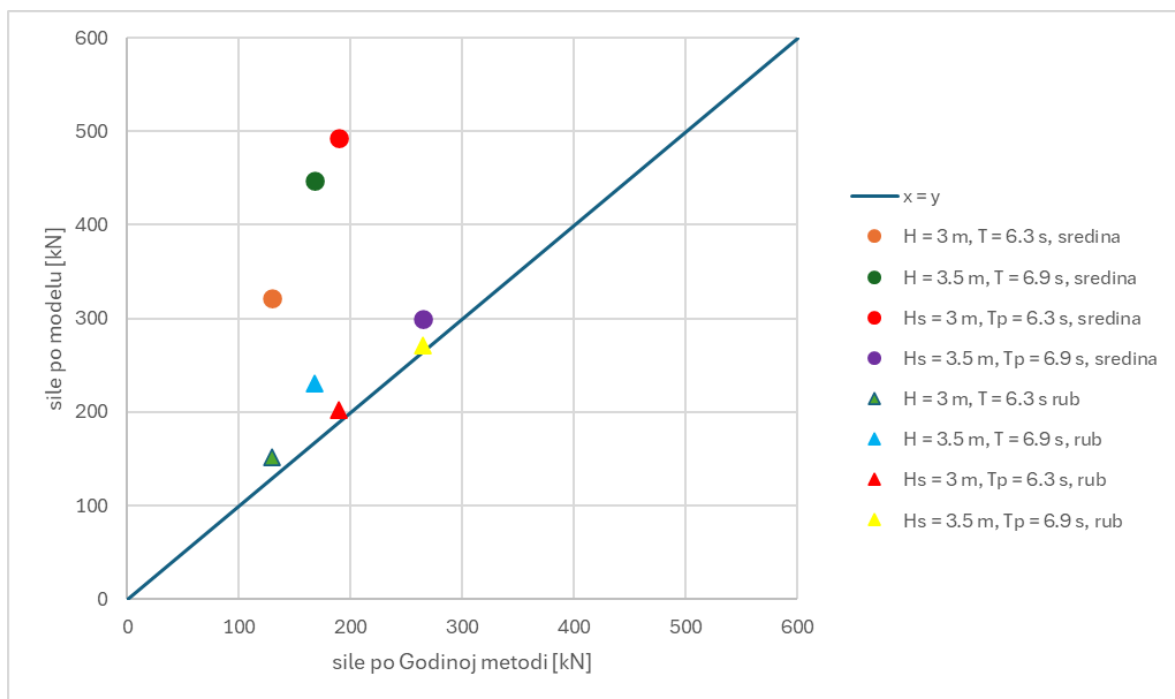
Konačno, za usporedbu djelovanja sile kada je parapetni zid postavljen na rub i na sredinu lukobrana prikazan je sljedeći dijagram na slici 48. Uspoređene su maksimalne sile na cjelokupnu konstrukciju u situacijama kada je parapetni zid postavljen na rubu i na sredini vertikalnog lukobrana.



Sl. 47 Grafički prikaz sile kada je parapetni zid postavljen na rub lukobrana u odnosu na sile kada je parapetni zid postavljen na sredinu

Na osi x se nalaze sile koje djeluju na konstrukciju kada je parapetni zid postavljen na sredini dok su na osi y sile koje djeluju na konstrukciju kada je parapet postavljen na rub. Uočeno je da su u svim slučajevima sile veće kada je zid na sredini (u prosjeku 1.7 puta). U grafički prikaz uzete su samo maksimalne sile za monokromatske i spektralne valove te za valne visine  $H(H_s) = 3 \text{ m}$  i  $H(H_s) = 3.5 \text{ m}$ .

Također, prikazan je odnos rezultirajućih sila koje djeluju na cijelu konstrukciju iz proračuna po Godinoj metodi sa silama iz numeričkog modela kada se parapetni zid nalazi na rubu te kada se nalazi na sredini lukobrana. Na osi x nalaze se sile po Godinoj metodi dok su na osi y sile iz modela. Na slici 49 grafički je prikazana distribucija sila te je uočeno da sile koje djeluju na parapetni zid postavljen na rubu lukobrana približno odgovaraju onima u proračunu dok su sile koje djeluju na zid postavljen na sredinu lukobrana generalno znatno veće. U prikaz su uvrštene sile tlaka dobivene iz proračuna Godinom metodom za čitavu konstrukciju parapetnog zida i lukobrana postavljenog na dubinu od 6 m te su uparene s maksimalnim silama očitanim iz numeričkog modela za monokromatske i spektralne valove valne visine  $H(H_s) = 3 \text{ m}$  i  $H(H_s) = 3.5 \text{ m}$ .



Sl. 48 Grafički prikaz odnosa sila dobivenih Godinom metodom te sila iz numeričkog modela

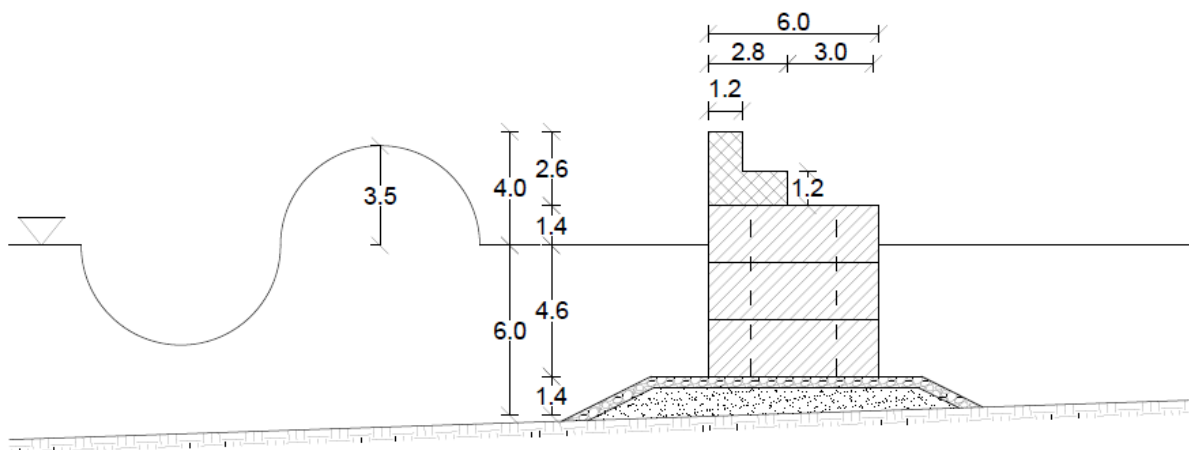
## 5. Proračun mehaničke otpornosti i stabilnosti parapetnog zida

Parapetni zid postavljen je na lukobran tipa zid pravokutnog oblika. Tijelo lukobrana sastavljeno je od armiranobetonskih blokova širine 6 metara koliko iznosi i kruna lukobrana. Konstrukcija lukobrana oslonjena je na temeljni nasip od kamenog nabačaja čija visina na nizvodnoj strani iznosi 1,4 m. U ovom primjeru prikazan je lukobran postavljen na dubini od 6 metara kakav je obrađen u prethodnom poglavlju s nadvišenjem nad mirnom morskom razi 1.4 m.

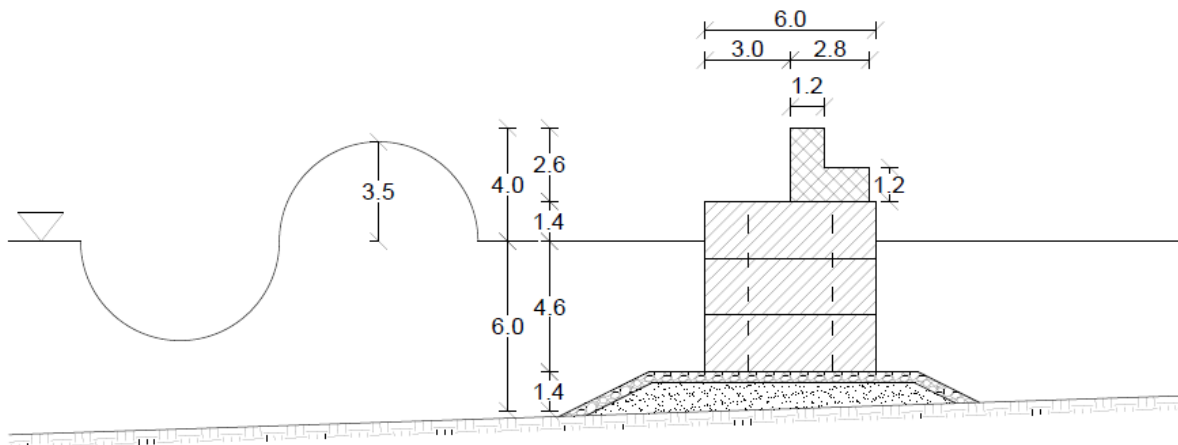
Na krunu lukobrana postavljen je armiranobetonski parapetni zid "L" poprečnog presjeka izveden na licu mjesta. Ukupna visina parapetnog zida iznosi 2,6 metara, a sastoji se od dvije betonske ploče razreda betona C 35/40. Horizontalna ploča polegnuta na tijelo lukobrana širine je 2,8 metara te debljine 1,2 m dok je vertikalna ploča visine 1,4 m te debljine 1,2 m. Parapetni zid armiran je čeličnim šipkama  $\phi = 20$  mm prethodno zaštićenim antikorozivnim premazom.

Izgradnjom parapetnog zida na kruni pravokutnog lukobrana tipa zid značajno se smanjuje korisna površina istog te se smanjuje opseg funkcionalnosti lukobrana što svakako treba uzeti u obzir prije odabira ovakvog rješenja. Funkcije poput utovara/istovara robe, ukrcaja/iskrcaja putnika te pristup većih vozila i strojeva bile bi znatno otežane ili potpuno onemogućene tako da je ovakvo rješenje prikladno za neuporabe krune lukobrana koje služe isključivo za zaštitu pozadinskog područja i za krune lukobrana koje su predviđene za turističke svrhe, odnosno kretanje ljudi.

Na slikama 50 i 51 dan je prikaz poprečnog presjeka vertikalnog lukobrana na dubini od 6 metara s parapetnim zidom izvedenim na vanjskom rubu krune te na sredini.



Sl. 49 Poprečni presjek parapetnog zida postavljenog na rubu lukobrana tipa zid na dubini od 8 m



Sl. 50 Poprečni presjek parapetnog zida postavljenog na sredinu lukobrana tipa zid na dubini od 8 m

Parapetni zid opterećen je konstantnim udarima valova stoga mora imati dostatnu vlastitu težinu kojom će se odupirati valnim silama kako ne bi došlo do pucanja samog zida ili gubitka njegove stabilnosti. Za potrebe ovog diplomskog rada provjerena je stabilnost parapetnog zida na klizanje i prevrtanje te je proračun izvršen za stalnu i prolaznu proračunsku situaciju. Temelj kontrole stabilnosti neke konstrukcije je granično stanje nosivosti iste dano izrazom:

$$E_d = f \left( \sum_{j \geq 1} (\gamma_G \times G_{k,j}) + \gamma_P \times P_k + \gamma_Q \times Q_{k,1} + \sum_{j \geq 1} (\gamma_Q \times \psi_0 \times Q_{k,i}) \right)$$

Sila koju nalet vala uzrokuje na parapet računa se kao suma svih tlakova koji djeluju na konturi parapeta pomnožena s pripadnom površinom. Za proračun stabilnosti korišteni su podaci o tlakovima prethodno prikazanim u tablici 6 i pripadajuće sile dobiveni iz proračuna Godinom metodom, a opterećenja su uzeta u obzir s pripadnim faktorima sigurnosti.

Za početak potrebno je izračunati vlastitu težinu parapetnog zida po metru dužnom izvedene konstrukcije. Specifična težina armiranog betona uzeta je sa 25 kN/m<sup>3</sup>, a proračun je izvršen po izrazu:

$$G = V \times \gamma_b$$

gdje je:

- G – vlastita težina parapetnog zida [kN]
- V – volumen parapetnog zida po metru duljine [m<sup>3</sup>]
- $\gamma_b$  – specifična težina armiranog betona [kN/m<sup>3</sup>]

Dobivena je vrijednost vlastite težine parapetnog zida od 126 kN.

Također, potrebno je odrediti težište poprečnog presjeka parapetnog zida, odnosno koordinate točke u kojoj djeluje sila G. Proces se vrši na sljedeći način, dvije ploče od kojih je parapetni zid sastavljen označene su sa 1 i 2 te je postavljen zamišljeni koordinatni usutav u točku A u kojoj se provjerava otpornost parapetnog zida na prevrtanje.

Postupak izračuna točke težišta dan je izrazima:

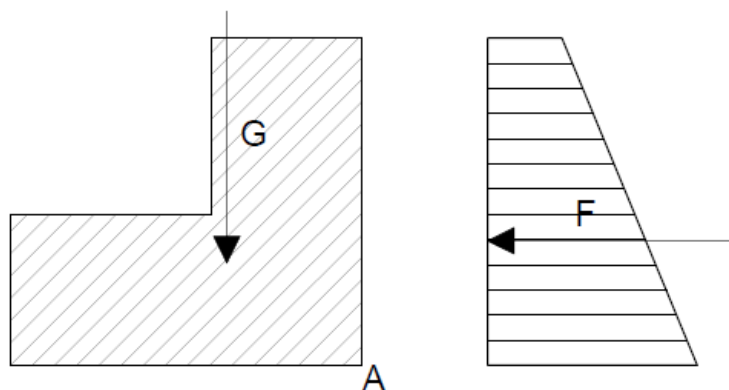
$$x_T = \frac{P_1 \times x_1 + P_2 \times x_2}{P_{UK}}$$

$$y_T = \frac{P_1 \times y_1 + P_2 \times y_2}{P_{UK}}$$

gdje je:

- $x_T$  – koordinata točke težišta po apcisi
- $y_T$  – koordinata točke težišta po ordinati
- $P_1$  – Površina vertikalnog dijela parapetnog zida
- $P_2$  – površina horizontalnog dijela parapetnog zida
- $x_1$  – udaljenost težišta vertikalnog dijela zida od točke A po apcisi
- $x_2$  – udaljenost težišta horizontalnog dijela zida od točke A po apcisi
- $y_1$  – udaljenost težišta vertikalnog dijela zida od točke A po ordinati
- $y_2$  – udaljenost težišta horizontalnog dijela zida od točke A po ordinati
- $P_{UK}$  – ukupna površina poprečnog presjeka parapetnog zida

Određene su koordinate težišta  $x_T, y_T = (1.13, 1.03)$ , a shematski prikaz djelovanja na parapetni zid prikazan je na slici 52.



Sl. 51 Shematski prikaz djelovanja valne sile na parapetni zid

Nadalje, određene su vrijednosti tlakova na razini nožice parapetnog zida te su izračunate pripadne sile za monokromatske i spektralne valove valnih visina  $H(H_s) = 3$  i  $3.5$  m po Godinoj metodi. Također, izražene su sile očitane iz numeričkog modela za lukobran postavljen na dubini od 6 metara te je sljedeće prikazano u tablici 7.

*Tablica 7 Proračun sila tlaka koje djeluju na parapetni zid*

Monokromatski valovi									
H	d	p2	p1	p3	pZ	F <sub>goda</sub>	F <sub>rub</sub>	F <sub>sredina</sub>	G
[m]	[m]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
3	8	2.5	22.4	14.0	15.4	23.3	-	-	126
3	6	2.7	24.3	17.4	16.7	25.3	<b>18.7</b>	<b>246.4</b>	126
3	4	3.0	27.1	21.8	18.7	28.2	-	-	126
3.5	8	6.5	27.5	18.8	20.2	34.7	-	-	126
3.5	6	7.1	29.8	22.6	21.8	37.6	<b>54.5</b>	<b>358.6</b>	126
3.5	4	7.9	33.1	27.7	24.3	41.8	-	-	126
Spektralni valovi									
3	8	10.9	29.8	16.7	23.2	44.3	-	-	126
3	6	11.9	32.6	21.5	25.4	48.4	<b>51.9</b>	<b>340.1</b>	126
3	4	13.6	37.3	28.6	29.0	55.4	-	-	126
3.5	8	19.4	39.4	24.6	32.4	67.4	-	-	126
3.5	6	21.3	43.3	30.8	35.6	74.0	<b>55.6</b>	<b>136.2</b>	126
3.5	4	24.7	50.1	40.2	41.2	85.6	-	-	126

Za vrijednosti valnih sila očitanih iz numeričkog modela uzete su maksimalne sile koje djeluju samo na parapetni zid dobivene integracijom ukupnih vrijednosti maksimalnih tlakova zabilježenih pomoću 14 numeričkih tlakomjera raspoređenih po vanjskoj konturi parapetnog zida. Vrijednosti sila koje djeluju na parapetni zid postavljen na sredini lukobrana ne razlikuju se znatno od vrijednosti očitanih za cjelokupnu konstrukciju. Što je jasno vidljivo na slikama 37, 39, 43 i 45. U ovim slučajevima su maksimalni tlakovi raspoređeni po parapetnom zidu te obuhvaćaju većinu ukupnog opterećenja.

## 5.1. Kontrola rotacije (EQU)

Kontrola rotacije vrši se usporedbom djelovanja odižućih i stabilizirajućih momenata na zamišljenu točku A na nožici parapetnog zida. Parcijalni koeficijenti sigurnosti za proračun uzeti su sa vrijednostima za stalnu i prolaznu proračunsku situaciju te su prikazani u tablici 8.

Tablica 8 Parcijalni koeficijenti sigurnosti za kontrolu stabilnosti na rotaciju

stalno		
nepovoljno	$\gamma_{G,dst}$	1.1
povoljno	$\gamma_{G,stb}$	0.9
promjenjivo		
nepovoljno	$\gamma_{Q,dst}$	1.5
povoljno	$\gamma_{Q,stb}$	0

Određeni su pripadni krakovi sila u odnosu na točku A parapetnog zida te je izvršen proračun momenata stabilizirajućih i destabilizirajućih djelovanja te je proračun kontrole stabilnosti dan izrazom:

$$E_d(F_{val}) \leq R_d(G)$$

Proračun je izvršen u računalnom programu microsoft Excel te su rezultati priloženi u sljedećoj tablici.

Tablica 9 . Prikaz rezultata proračuna stabilnosti na ptevrtnje parapetnog zida za monokromatske i spektralne valove valnih visina  $H(H_s) = 3 \text{ m}$  i  $H(H_s) = 3.5 \text{ m}$

H/hs [m]	d [m]	p2 [kPa]	pz [kPa]	h [m]	zF [m]	F [kN]	$\gamma_Q$ [-]	Ed [kNm]	G [kN]	zG [m]	$\gamma_G$ [-]	Rd [kNm]
Monokromatski valovi												
3	8	2.49	15.41	2.6	0.99	23.3	1.5	34.5	126	1.13	0.9	128.1
3	6	2.70	16.75	2.6	0.99	25.3	1.5	37.4	126	1.13	0.9	128.1
3	4	3.01	18.68	2.6	0.99	28.2	1.5	41.7	126	1.13	0.9	128.1
3.5	8	6.55	20.17	2.6	1.08	34.7	1.5	56.2	126	1.13	0.9	128.1
3.5	6	7.09	21.84	2.6	1.08	37.6	1.5	60.9	126	1.13	0.9	128.1
3.5	4	7.88	24.28	2.6	1.08	41.8	1.5	67.7	126	1.13	0.9	128.1
Spektralni valovi												
3	8	10.88	23.18	2.6	1.14	44.3	1.5	76.0	126	1.13	0.9	128.1
3	6	11.90	25.36	2.6	1.14	48.4	1.5	83.1	126	1.13	0.9	128.1
3	4	13.62	29.02	2.6	1.14	55.4	1.5	95.1	126	1.13	0.9	128.1
3.5	8	19.40	32.42	2.6	1.19	67.4	1.5	120.4	126	1.13	0.9	128.1
3.5	6	21.30	35.60	2.6	1.19	74.0	1.5	132.2	126	1.13	0.9	128.1
3.5	4	24.65	41.20	2.6	1.19	85.6	1.5	153.0	126	1.13	0.9	128.1
Numerički model												
3	6	Monokromatski valovi		rub	0.99	18.7	1.5	27.8	126	1.13	0.9	128.1
3.5	6				1.11	54.5	1.5	90.7	126	1.13	0.9	128.1
3	6			sredina	1.13	246.4	1.5	417.6	126	1.13	0.9	128.1
3.5	6				0.87	358.6	1.5	468.0	126	1.13	0.9	128.1
3	6	Spektralni valovi		rub	1.09	51.9	1.5	84.9	126	1.13	0.9	128.1
3.5	6				1.21	55.6	1.5	100.9	126	1.13	0.9	128.1
3	6			sredina	1.73	340.1	1.5	882.6	126	1.13	0.9	128.1
3.5	6				0.79	136.2	1.5	161.4	126	1.13	0.9	128.1

Iz proračuna je vidljivo da je parapetni zid dovoljno robustan da se odupre prevrtanju od naleta većine valnih sila. Sile uzrokovane monokromatskim valovima su u pravilu manjeg iznosa pa tako parapetni zid prolazi provjeru na prevrtanje za monokromatske valove.

S druge strane kod valnih sila prouzrokovanih spektralnim valovima evidentno je koliko vrijednost iznosa sile tlaka ovisi o dubini na kojoj je izgrađen lukobran te parapetni zid neće zadržati stabilnost za nalete spektralnih valova  $H_s = 3.5$  m kada je lukobran postavljen na dubine 4 i 6 m. Ovaj problem moguće je riješiti izvedbom manje kontrafore ili povećanjem dimenzija parapetnog zida s obzirom da su razlike između kombinacije djelovanja i otpornosti na prevrtanje razmjerno male. Ipak, povećanje dimenzija parapeta nije preporučeno zbog funkcionalnih razloga.

Što se tiče valnih sila očitanih iz numeričkog modela, vidljivo je da je u svim slučajevima kada je parapetni zid postavljen na rub lukobrana otpornost zida na prevrtanje dostatna da zadovolji provjeru. U slučajevima kada je parapetni zid postavljen na sredinu lukobrana, napadno djelovanje od valne sile je višestruko veće od otpornosti na prevrtanje stoga definitivno nije preporučena izgradnja parapetnog zida u toj situaciji.

Otpornost je moguće značajno povećati sidrenjem parapetnog zida u tijelo lukobrana no tada bi se morala izvršiti analiza opterećenja i proračun otpornosti za cjelokupnu konstrukciju kao jednu monolitnu strukturu što nije obuhvaćeno u temi ovog diplomskog rada.

## 5.2. Kontrola klizanja (GEO+STR)

Potrebno je izračunati proračunski kut trenja između krune lukobrana i parapetnog zida. Kut trenja  $\varphi_k = 40^\circ$  preuzet je iz literature i odnosi se na kontakt beton-beton, a parcijalni koeficijent  $\gamma_{\varphi d} = 1.25$ .

$$tg\varphi_d = \frac{tg\varphi_k}{\gamma_{\varphi d}}$$

Parcijalni koeficijenti sigurnosti za provjeru stabilnosti na klizanje preuzeti su iz literature, a odnose se na stalnu i prolaznu proračunsku situaciju za projektiranje pomorskih građevina te su prikazani u tablici 10.



Tablica 10 Parcijalni koeficijenti sigurnosti za proračun kontrole stabilnosti na klizanje

stalno		
nepovoljno	$\gamma_{G,dst}$	1.35
povoljno	$\gamma_{G,stb}$	1
promjenjivo		
nepovoljno	$\gamma_{Q,dst}$	1.5
povoljno	$\gamma_{Q,stb}$	0

Proračun se provodi tako da se uspoređi horizontalna sila od naleta vala na konturu parapetnog zida sa silom od vlastite težine zida pomnoženom s tangensom proračunskog kuta trenja kako je prikazano u sljedećem izrazu:

$$R_d = G \times \operatorname{tg}\varphi_d$$

$$E_d(F_{val}) \leq R_d(G)$$

Proračun je izvršen u računalnom programu Microsoft Excel te su rezultati dani u sljedećoj tablici

Tablica 11 . Prikaz rezultata proračuna stabilnosti na klizanje parapetnog zida za monokromatske i spektralne valove valnih visina  $H(H_s) = 3 \text{ m}$  i  $H(H_s) = 3.5 \text{ m}$

H/hs	d	p2	pz	h	F	$\gamma_Q$	Ed	G	$\operatorname{tg}\varphi_d$	$\gamma_G$	Rd
[m]	[m]	[kPa]	[kPa]	[m]	[kN]	[-]	[kN]	[kN]	[m]	[-]	[kN]
Monokromatski valovi											
3	8	2.49	15.41	2.6	23.3	1.5	34.5	126	0.67	1.0	84.4
3	6	2.70	16.75	2.6	25.3	1.5	37.4	126	0.67	1.0	84.4
3	4	3.01	18.68	2.6	28.2	1.5	41.7	126	0.67	1.0	84.4
3.5	8	6.55	20.17	2.6	34.7	1.5	56.2	126	0.67	1.0	84.4
3.5	6	7.09	21.84	2.6	37.6	1.5	60.9	126	0.67	1.0	84.4
3.5	4	7.88	24.28	2.6	41.8	1.5	67.7	126	0.67	1.0	84.4
Spektralni valovi											
3	8	10.88	23.18	2.6	44.3	1.5	76.0	126	0.67	1.0	84.4
3	6	11.90	25.36	2.6	48.4	1.5	83.1	126	0.67	1.0	84.4
3	4	13.62	29.02	2.6	55.4	1.5	95.1	126	0.67	1.0	84.4
3.5	8	19.40	32.42	2.6	67.4	1.5	120.4	126	0.67	1.0	84.4
3.5	6	21.30	35.60	2.6	74.0	1.5	132.2	126	0.67	1.0	84.4
3.5	4	24.65	41.20	2.6	85.6	1.5	153.0	126	0.67	1.0	84.4
Numerički model											
3	6	Monokromatski valovi		rub	18.7	1.5	28.1	126	0.67	1.0	84.4
3.5	6				54.5	1.5	81.8	126	0.67	1.0	84.4
3	6			sredina	246.4	1.5	369.6	126	0.67	1.0	84.4
3.5	6				358.6	1.5	537.9	126	0.67	1.0	84.4
3	6	Spektralni valovi		rub	51.9	1.5	77.9	126	0.67	1.0	84.4
3.5	6				55.6	1.5	83.4	126	0.67	1.0	84.4
3	6			sredina	340.1	1.5	510.2	126	0.67	1.0	84.4
3.5	6				136.2	1.5	204.3	126	0.67	1.0	84.4

Proračunom su uspoređeni djelovanje na konstrukciju u vidu napadne sile tlaka uzrokovane valovima te proračunska otpornost parapetnog zida zbog njegove vlastite težine. Kao i kod provjere stabilnosti na prevrtanje, parapetni ima dovoljno visoku vrijednost otpornosti da se odupre djelovanjima uzrokovanim monokromatskim valovima.

U slučaju spektralnih valova, parapetni zid prolazi kontrolu za nalete sila od valova visine  $H_s = 3$  m za lukobrane postavljene na dubinama od 8 i 6 m. Kod ostalih spektralnih valova opterećenje je preveliko te bi bilo potrebno povećati otpornost parapetnog zida izgradnjom kontrafore ili izvođenjem temeljnog klina na kontaktnoj podlozi između zida i krune lukobrana.

Za djelovanja uzrokovana silama iz numeričkog modela vrijede ista pravila kao i za kontrolu prevrtanja. Sile koje se javljaju na konturi parapetnog zida kada je isti postavljen na sredini lukobrana su prevelike te se ne preporuča izvođenje ovakvog rješenja dok sile na rubu, koje približno i odgovaraju silama iz Godine metode, ne predstavljaju problem za stabilnost konstrukcije.

## 6. Troškovnik izvedbe parapetnog zida na postojećim lukobranima

Parapetni zid sastoji se od dvije armiranobetonske ploče dimenzija 2,8x1,2 i 1,4x 1,2. Predviđeno je da se izvedba odvija betoniranjem na licu mjesta na već postojećim lukobranima gdje se pokaže potreba za takvim rješenjem.

Jedinična cijena izvedbe jednog kubnog metra parapetnog zida procijenjena je na 300 € što uključuje troškove postavljanja i skidanja oplata, cijenu čelika porebnog za armiranje, troškove savijanja vezanja i postavljanja armature te samo betoniranje.

Proračun je izvršen po metru dužnom parapetnog zida te su rezultati dani u tablici ispod

*Tablica 12 Troškovnik izvedbe parapetnog zida po m' konstrukcije*

Naziv stavke	Količina	Jedinica	Cijena	Jedinica	Ukupno	Jedinica
Betoniranje armiranobetonskog parapetnog zida, postavljanje i skidanje oplata, rezanje savijanje i postavljanje armaturnog čelika, troškovi radne snage	5.04	m3	300	€	1512	€

## 7. Zaključak

Klimatske promjene imaju utjecaj na sve sfere ljudskog života te su prilagodbe na njih postale jedan od osnovnih zadataka kod pripreme i planiranja budućih projekata pomorskih građevina. U sklopu ovog diplomskog rada analizirani su različiti načini prilagodbe klimatskim promjenama te je podrobno opisana jedna takva prilagodba u vidu izgradnje parapetnog zida na kruni postojećeg lukobrana čiji je zadatak spriječiti prelijevanje te zaštititi pozadinsko područje od prodora morske vode. Konstantnim porastom globalne temperature i izdizanjem srednje razine mora brojne pomorske građevine dolaze u opasnost da postanu nedostatne za izvršavanje osnovnih zadataka zbog kojih su izgrađene, stoga je važno da inženjeri prate klimatske trendove te u svoje projekte uključuje studije i analize koje mogu pomoći u približnom predviđanju utjecaja klimatskih promjena na buduće projekte.

Opisan je parapetni zid sastavljen od dvije armiranobetonske ploče dimenzija 2.8x1.2 m i 1.4x1.2 m. ukupna visina parapetnog zida iznosi 2.6 m što uz nadvišenje lukobrana iznad mirne morske razi od 1.4 m čini ukupno nadvišenje od 4 m iznad razine mora.

Izrađen je numerički model opterećenja i prelijevanja parapetnog zida za monokromatske i spektralne valove valnih visina  $H(H_s) = 3$  m i  $H(H_s) = 3.5$  m te valnih perioda  $T(T_p) = 6.3$  s i  $T(T_p) = 6.9$  s te za dubine na kojima je postavljen lukobran u iznosu od 8, 6 i 4 m. Za provođenje simulacija korišten je model Flow-3D te su dobiveni tlakovi na vanjskoj konturi parapetnog zida postavljenog na rubu i na sredini vertikalnog lukobrana tipa zid zabilježeni pomoću numeričkih tlakomjera raspoređenih duž konture zida. Integracijom tlakova dobivene su vrijednosti valnih sila koje djeluju na parapetni zid te je zaključeno kako se znatno veće sile javljaju na parapetnom zidu postavljenom na sredinu lukobrana.

Numerički model obuhvaća i prelijevanje preko zida te su provedene simulacije za spektralne valove  $H_s = 3$  i  $3.5$  m  $T_p = 6.3$  i  $6.9$  s te su dobiveni intenziteti prelijevanja za parapetni zid postavljen na rub lukobrana. Ti su rezultati uspoređeni s empirijskim izrazima, a konačna usporedba pokazala je da nema većeg odudaranja. Na posljertku su uspoređeni rezultati simulacije za prelijevanje kada se parapet nalazi na rubu i na sredini te je uočeno da je razina prelijevanja manja za parapet postavljen na sredini unatoč većim silama.

Nadalje izvršen je proračun dinamičkog tlaka vala Godinom metodom te su dobiveni tlakovi na parapetni zid i na cijeli lukobran. Izvršena je usporedba tlakova na cjelokupnu konstrukciju te je zaključeno da je Godina metoda prilično pouzdana za približno određivanje tlakova i sila kada je parapetni zid postavljen na rub lukobrana za razliku od slučaja kada je parapet postavljen na sredinu gdje se javljaju iznimno velike sile na kontaktu parapeta i lukobrana što se može pripisati formiranju zarobljenog zračnog mjehura koji pod pritiskom eksplodira te u trenutku proizvede enormnu količinu tlaka te samim time i pripadnu silu na parapetni zid.

Dana je usporedba sila i tlakova dobivenih proračunom te očitanim iz modela te je izvršen proračun stabilnosti za stalnu i prolaznu proračunsku situaciju u vidu kontrole na prevrtanje i klizanje. Kontrola na prevrtanje pokazala je da parapetni zid ima dostatnu otpornost na djelovanja prouzrokovana monokromatskim valovima te da zadovoljava uvjet stabilnosti za

spektralne valove visina  $H_s = 3$  m dok za valove visine  $H_s = 3.5$  m, ne zadovoljava u slučajevima kada je lukobran izveden na dubinama od 6 i 4 m. Za sile iz numeričkog modela parapetni zid prolazi kontrolu na prevrtanje kada je postavljen na rub lukobrana dok su sile koje djeluju kad je zid postavljen na sredinu prevelike.

Daljnjim proračunom stabilnosti provedena je i kontrola klizanja. Rezultati su nalik na one od kontrole prevrtanja pa je tako parapetni zid zadovoljio provjeru na sva opterećenja od monokromatskih valova dok za spektralne nije bio dovoljno robustan kad su u pitanju sile vala visine  $H = 3$  m kada je lukobran izveden na dubini od 4 m te za sve valove visine  $H_s = 3.5$  m. Sile iz modela u slučaju kada je parapet postavljen na sredinu ponovno su bile prevelike za proračun otpornosti dok su sile koje djeluju na parapet postavljen na rub dovoljno male da im se zid može oduprijeti.

Na posljertku je izrađen i troškovnik koji obuhvaća sve stavke koje uključuje izgradnja jednog ovakvog projekta. Jedinična cijena jednog  $m^3$  parapetnog zida pretpostavljena je na 300 € te je cijena po  $m'$  konstrukcije izračunata te je dobiven iznos od 1512 €/m'

Zaključno, unatoč značajnom smanjenju količine prelijevanja preko parapetnog zida izvedenog na sredini vertikalnog lukobrana (prosječno 20 %), ne preporuča se njegova izvedba na sredini zbog iznimno velikih i nepredvidivih udara sile uzrokovanih zarobljenim zračnim mjehurom koji su u stanju narušiti stabilnost konstrukcije. Procijenjeno je da sidrenje konstrukcije u tijelo lukobrana može biti dostatno rješenje, ali potrebno je daljnje istraživanje jer se u tom slučaju cjelokupna konstrukcija mora promatrati kao monolitna. Manje korekcije mogu se izvesti u vidu kontrafora ili izrade temeljnog klina no to neće previše utjecati na stabilnost te je povoljno samo za manje korekcije.

Izgradnja parapetnog zida na kruni već postojećeg lukobrana može biti zadovoljavajuća i relativno povoljna metoda za parapete manjih dimenzija, ali samo u područjima gdje nisu karakteristični snažni naleti valova te lukobrane čija kruna mora obavljati više funkcija poput prometa robe i putnika.

## POPIS LITERATURE

- [1] van Vuuren, D.P. et al.: The representative concentration pathways: an overview, 2011.
- [2] Wikipedia: Representative concentration pathways
- [3] van Gent, M.R.A: Climate Adaptation of Coastal Structures, SCACR2019, Bari, Italija, 2019.
- [4] Romano, A., Bellotti, G: Wave forces on vertical caissons with retreated wall: A first experimental insight, Sveučilište u Rimu, Građevinski fakultet, 2023.
- [5] Pršić, M., Carević, D: Pomorske građevine-web skripta, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2023.
- [6] Goda, Y: Random seas and design of maritime structures, Sveučilište u Tokiju, 2000.
- [7] van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H. et al: Manual of wave overtopping of sea defences and related structures, EurOtop, 2018.
- [8] Lončar, G., Carević, D. et al: Numerical study of the sea wave loading on a vertical parapet wall and overtopping, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2024.

## POPIS SLIKA

Sl. 1 Grafički prikaz trajektorija koje predstavljaju scenarije reprezentativnih koncentracijskih putova za 21. stoljeće .....	2
Sl. 2 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu izgradnje valoloma ispred glavnog lukobrana tipa nasip .....	4
Sl. 3 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu izgradnje valoloma ispred glavnog lukobrana tipa zid .....	5
Sl. 4 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu nasipavanja terena neposredno ispred lukobrana tipa nasip .....	5
Sl. 5 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu nasipavanja terena neposredno ispred lukobrana tipa zid .....	5
Sl. 6 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu izgradnje berme na lukobranu tipa nasip .....	6
Sl. 7 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu izgradnje berme na lukobranu tipa zid .....	6
Sl. 8 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu izgradnje betonskog parapetnog zida na kruni lukobrana tipa nasip .....	7
Sl. 9 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu izgradnje betonskog parapetnog zida na kruni lukobrana tipa zid .....	7
Sl. 10 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu povećanja hrapavosti vanjskog pokosa lukobrana tipa nasip .....	7
Sl. 11 Grafički prikaz metode prilagodbe klimatskim promjenama u vidu ojačanja unutarnjeg pokosa lukobrana tipa nasip .....	8
Sl. 12 Shematski prikaz geometrije numeričkog valnog kanala i analiziranih vertikalnih presjeka lukobrana sa parapetnim zidovima .....	11
Sl. 13 Maksimalni modelski tlakovi na svim numeričkim tlakomjerima (od 1 u korjenu parapetnog zida do 14 na vrhu parapetnog zida) tijekom simulacijskog razdoblja od 600s za monokromatske valove $H = 3$ m i $H = 3.5$ m kada je parapetni zid na rubu lukobrana .....	13
Sl. 14 Maksimalni modelski tlakovi na svim numeričkim tlakomjerima (od 1 u korjenu parapetnog zida do 14 na vrhu parapetnog zida) tijekom simulacijskog razdoblja od 600s za spektralne valove $H_s = 3$ m i $H_s = 3.5$ m kada je parapetni zid na rubu lukobrana .....	13
Sl. 15 Maksimalni modelski tlakovi na svim numeričkim tlakomjerima (od 1 u korjenu parapetnog zida do 14 na vrhu parapetnog zida) tijekom simulacijskog razdoblja od 600s za monokromatske valove $H = 3$ m i $H = 3.5$ m kada je parapetni zid na sredini lukobrana .....	14
Sl. 16 Maksimalni modelski tlakovi na svim numeričkim tlakomjerima (od 1 u korjenu parapetnog zida do 14 na vrhu parapetnog zida) tijekom simulacijskog razdoblja od 600s za spektralne valove $H_s = 3$ m i $H_s = 3.5$ m kada je parapetni zid na sredini lukobrana .....	14
Sl. 17 Dinamika sile tlaka po m' vanjske konture parapetnog zida na kojoj se nalaze numerički tlakomjeri (analize 1,3,5 $H_s = 3$ m ; parapetni zid na vanjskoj konturi lukobrana) .....	15
Sl. 18 Dinamika sile tlaka po m' vanjske konture parapetnog zida na kojoj se nalaze numerički tlakomjeri (analize 2,4,6 $H_s = 3.5$ m ; parapetni zid na vanjskoj konturi lukobrana) .....	16

Sl. 19 Dinamika sile tlaka po m' vanjske konture parapetnog zida na kojoj se nalaze numerički tlakomjeri (analize 7,9,11 Hs = 3 m ; parapetni zid uvučen za 3m).....	16
Sl. 20 Dinamika sile tlaka po m' vanjske konture parapetnog zida na kojoj se nalaze numerički tlakomjeri (analize 8,10,12 Hs = 3.5 m ; parapetni zid uvučen za 3m).....	17
Sl. 21 Nomogram za procjenu inteziteta prelijevanja po Godi na vetrikalnom nagibu terena 1/30 te za omjer Ho'/Lo = 0.012 .....	19
Sl. 22 Nomogram za procjenu inteziteta prelijevanja po Godi na vetrikalnom nagibu terena 1/30 te za omjer Ho'/Lo = 0.017 .....	20
Sl. 23 Nomogram za procjenu inteziteta prelijevanja po Godi na vetrikalnom nagibu terena 1/30 te za omjer Ho'/Lo = 0.036 .....	20
Sl. 24 Dinamika preljevanja po m' konstrukcije lukobrana (analize 1,3,5 □ Hs = 3.5m ; parapetni zid na vanjskoj konturi lukobrana).....	21
Sl. 25 Dinamika preljevanja po m' konstrukcije lukobrana (analize 2,4,6 □ Hs = 3.0m ; parapetni zid na vanjskoj konturi lukobrana).....	21
Sl. 26 Dinamika preljevanja po m' konstrukcije lukobrana (analize 7,9,11 □ Hs = 3.5m ; parapetni zid uvučen za 3m).....	22
Sl. 27 Dinamika preljevanja po m' konstrukcije lukobrana (analize 8,10,12 □ Hs = 3.0m ; parapetni zid uvučen za 3 m.....	22
Sl. 28 Usporedba intenziteta prelijevanja dobivenog numeričkim modelom i primjenom empirijskih obrazaca (numerički rezultati samo za slučaj parapetnog zida postavljenog na vanjskoj strani lukobrana) .....	23
Sl. 29 Usporedba intenziteta prelijevanja za parapetni zid na prednjoj strani lukobrana (zid ispred) i sa pomakom od 3m (zid sredina) .....	24
Sl. 31 Definijska skica za proračun dinamičkog tlaka vala na vertikalni zid po Godi.....	26
Sl. 32 Raspored sila u vremenu na lukobran i parapetni zid za monokromatski val visine H = 3 m kad je parapetni zid postavljen na rub lukobrana.....	30
Sl. 33 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na rubu lukobrana od monokromatskih valova visine H = 3 m .....	30
Sl. 34 Raspored sila u vremenu na lukobran i parapetni zid za monokromatski val visine H = 3.5 m kad je parapetni zid postavljen na rub lukobrana.....	31
Sl. 35 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na rubu lukobrana od monokromatskih valova visine H = 3.5 m .....	31
Sl. 36 Raspored sila u vremenu na lukobran i parapetni zid za monokromatski val visine H = 3 m kad je parapetni zid postavljen na sredinu lukobrana .....	32
Sl. 37 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na sredinu lukobrana od monokromatskih valova visine H = 3 m .....	32
Sl. 38 Raspored sila u vremenu na lukobran i parapetni zid za monokromatski val visine H = 3.5 m kad je parapetni zid postavljen na sredinu lukobrana .....	33
Sl. 39 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na sredinu lukobrana od monokromatskih valova visine H = 3.5 m .....	33
Sl. 40 Raspored sila u vremenu na lukobran i parapetni zid za spektralni val visine Hs=3m kad je parapetni zid na rubu lukobrana .....	34
Sl. 41 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na rubu lukobrana od spektralnih valova visine Hs = 3 m .....	34



Sl. 42 Raspored sila u vremenu na lukobran i parapetni zid za spektralni val visine $H_s=3.5\text{m}$ kad je parapetni zid na rubu lukobrana .....	35
Sl. 43 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na rubu lukobrana od spektralnih valova visine $H_s = 3,5 \text{ m}$ .....	35
Sl. 44 Raspored sila u vremenu na lukobran i parapetni zid za spektralni val visine $H_s=3\text{m}$ kad je parapetni zid na sredini lukobrana .....	36
Sl. 45 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na sredinu lukobrana od spektralnih valova visine $H_s = 3 \text{ m}$ .....	36
Sl. 46 Raspored sila u vremenu na lukobran i parapetni zid za spektralni val visine $H_s=3.5\text{m}$ kad je parapetni zid na sredini lukobrana .....	37
Sl. 47 Grafički prikaz ukupnih tlakova na parapetni zid postavljen na sredinu lukobrana od spektralnih valova visine $H_s = 3,5 \text{ m}$ .....	37
Sl. 48 Grafički prikaz sila kada je parapetni zid postavljen na rub lukobrana u odnosu na sile kada je parapetni zid postavljen na sredinu .....	38
Sl. 49 Grafički prikaz odnosa sila dobivenih Godinom metodom te sila iz numeričkog modela .....	39
Sl. 50 Poprečni presjek parapetnog zida postavljenog na rubu lukobrana tipa zid na dubini od 8 m .....	40
Sl. 51 Poprečni presjek parapetnog zida postavljenog na sredinu lukobrana tipa zid na dubini od 8 m .....	41
Sl. 52 Shematski prikaz djelovanja valne sile na parapetni zid .....	42

## POPIS TABLICA

Tablica 1 Predviđene razine porasta globalne temperature po RCP scenarijima za 21. stoljeće	2
Tablica 2 Predviđene razine izdizanja srednje razine mora prema RCP scenarijima za 21. stoljeće.....	3
Tablica 3 Nomenklatura provedenih numeričkih simulacija – spektralni valovi.....	12
Tablica 4 Nomenklatura provedenih numeričkih simulacija – monokromatski valovi.....	12
Tablica 5 Vrijednosti intenziteta i volumena prelijevanja za parapetni zid izveden na rubu i na sredini vertikalnog lukobrana uzrokovanog naletom spektralnih valova visina $H_s = 3$ m i $H_s = 3.5$ m.....	24
Tablica 6 Rezultati proračuna po Godinoj metodi.....	28
Tablica 7 Proračun sila tlaka koje djeluju na parapetni zid.....	43
Tablica 8 Parcijalni koeficijenti sigurnosti za kontrolu stabilnosti na rotaciju .....	44
Tablica 9 . Prikaz rezultata proračuna stabilnosti na ptevrtnje parapetnog zida za monokromatske i spektralne valove valnih visina $H(H_s) = 3$ m i $H(H_s) = 3.5$ m .....	44
Tablica 10 Parcijalni koeficijenti sigurnosti za proračun kontrole stabilnosti na klizanje.....	46
Tablica 11 . Prikaz rezultata proračuna stabilnosti na klizanje parapetnog zida za monokromatske i spektralne valove valnih visina $H(H_s) = 3$ m i $H(H_s) = 3.5$ m .....	46
Tablica 12 Troškovnik izvedbe parapetnog zida po m <sup>3</sup> konstrukcije .....	48