

VALNA OPTEREĆENJA NA VERTIKALNI LUKOBRAN S UVUČENIM PARAPETNIM ZIDOM

IVAN ŽIGO¹, DALIBOR CAREVIĆ², GORAN LONČAR², DAMJAN BUJAK², NINO KRVAVICA³, DINKO HREŠIĆ¹

¹ MareCon d.o.o., Hrvatska

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Hrvatska

³ Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Hrvatska

Sažetak

Vertikalni lukobrani duž hrvatske obale često se, radi racionalizacije konstrukcije, izvode s uvučenim parapetnim zidom. Utjecaj takvog uvlačenja na intenzitet i distribuciju valnih opterećenja, a time i na ukupnu stabilnost lukobrana, do danas nije dostatno istražen. Iz tog je razloga provedeno numeričko istraživanje na dvanaest modela lukobrana, u okviru kojeg su analizirana tri različita položaja parapetnog zida za četiri različite dubine vode ispred lukobrana. Analiza je provedena za pravilne valove te za relativno širok raspon omjera valne visine i dubine vode ispred lukobrana (H/h), s posebnim naglaskom na ispitivanje utjecaja uvlačenja parapetnog zida kod lukobrana koji se nalaze u plitkovodnom području. Rezultati istraživanja su pokazali da uvlačenje parapetnog zida općenito dovodi do pojave impulsnih opterećenja, pri čemu su ona učestalija i izraženija kod zidova s manjom uvlakom. Ekstremni pritisci na lukobran s uvučenim parapetnim zidom mogu biti i do 30 puta veći u odnosu na lukobran kod kojeg parapetni zid nije uvučen. Istraživanjem je utvrđeno i kako uvlačenjem parapetnog zida općenito dolazi do povećanja ukupnih sila na lukobran što je isključiva posljedica pojave ekstremnih impulsnih udara na uvučeni parapetni zid. Najveće vrijednosti impulsnih opterećenja u okviru numeričkog istraživanja zabilježene su kod najbližeg analiziranog lukobrana, pri omjeru $H/h = 0,70$.

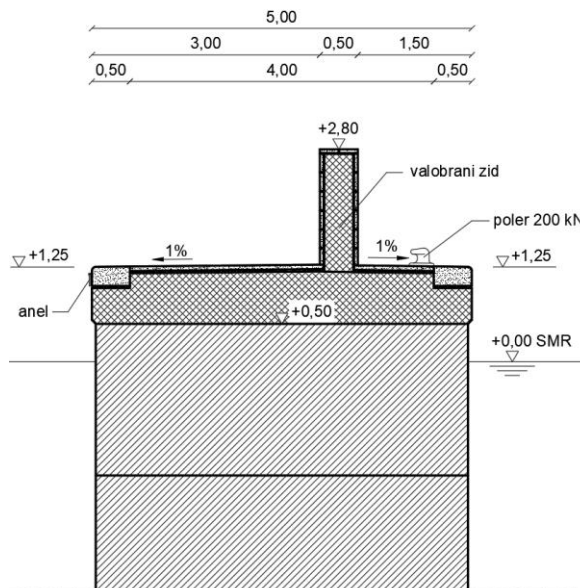
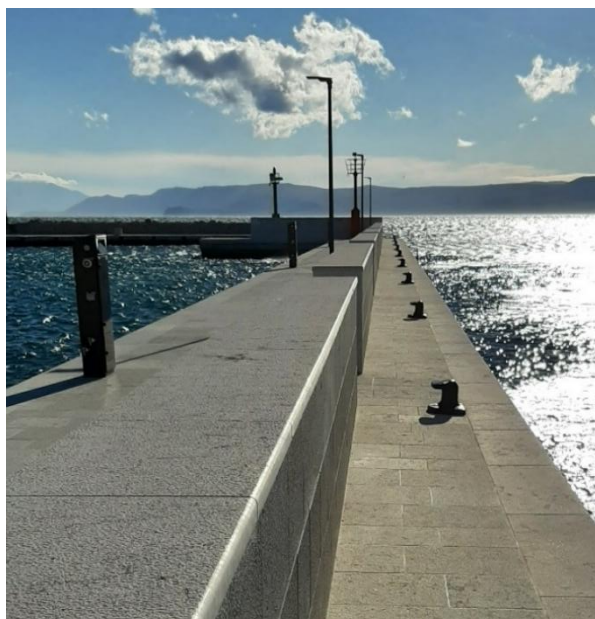
Ključne riječi

vertikalni lukobran, uvučeni parapetni zid, valna opterećenja, impulsni udar, plitkovodno područje, numeričke simulacije

1 Uvod

Vertikalni lukobrani se u nadmorskom dijelu, s ciljem redukcije troškova izgradnje lukobrana i osiguranja funkcionalnosti, uobičajeno izvode s parapetnim zidom koji je uži od pune širine lukobrana. Kako bi se tijekom povoljnih vremenskih uvjeta omogućio privez plovila i s vanjske strane lukobrana, parapetni zidovi se duž hrvatske obale Jadranskog mora često izvode uvučeno u odnosu na vanjsko lice trupa lukobrana, kao što je prikazano na primjeru zapadnog lukobrana luke u Crikvenici (Slika 1.). Ovo uvlačenje parapetnih zidova najčešće se prilikom dimenzioniranja konstrukcije lukobrana ne uzima posebno u obzir ili se tretira kao povoljna geometrijska modifikacija presjeka kojom se u određenoj mjeri reducira opterećenje valovima. Takav pristup proizlazi iz činjenice da u aktualnoj stručnoj literaturi (Goda, 2010; Takahashi, 2002; Oumeraci et al., 2001; OCDI, 2009; USACE, 2011) ne postoji pouzdan metodološki okvir za proračun vertikalnih lukobrana s uvučenim parapetnim zidom. Tek su novija eksperimentalna istraživanja (Lee and Park, 2020; Romano and Bellotti, 2023; Romano et al., 2024) konkretnije obradila ovu problematiku, no ona su obuhvatila ograničen skup kombinacija valnih i geometrijskih parametara pa se njihovi rezultati ne mogu univerzalno primijeniti.

Konkretno, u predmetnim istraživanjima je ispitan omjer između valne visine i dubine vode ispred lukobrana (H/h) u vrijednostima između 0,10 i 0,38 što predstavlja uvjete relativno duboke vode. Stoga je cilj ovog rada bio utvrditi utjecaj uvlačenja parapetnog zida na raspodjelu i intenzitet valnih pritisaka na vertikalni lukobran u plitkovodnim uvjetima pomoću numeričkih modela lukobrana.



Slika 1. Uvučeni parapetni zid zapadnog lukobrana u luci Crikvenica (Izvor: arhiva MARECON d.o.o., Rijeka)

2 Metode

Kroz numeričko istraživanje testirane su četiri geometrijske konfiguracije lukobrana za tri konfiguracije parapetnog zida lukobrana što je dalo ukupno dvanaest različitih numeričkih simulacija. U okviru prve geometrijske konfiguracije razmatrano je ravno (horizontalno) dno te kompozitni vertikalni lukobran (simulacije oznaka 1 – 3). Ova geometrijska konfiguracija lukobrana ujedno je jednaka konfiguraciji koju su kroz svoje eksperimentalno istraživanje ispitali Romano i Bellotti, a koja približno odgovara produženom dijelu glavnog lukobrana u luci Civitavecchia u Italiji u Froude-ovu mjerilu od 1:50 (Romano and Bellotti, 2023). Preostale tri konfiguracije odnosile su se na klasični vertikalni lukobran oslonjen izravno na osnovnu podlogu, koja je u tim simulacijama bila izvedena s nagibom 1:30 (simulacije oznaka 4 – 12).

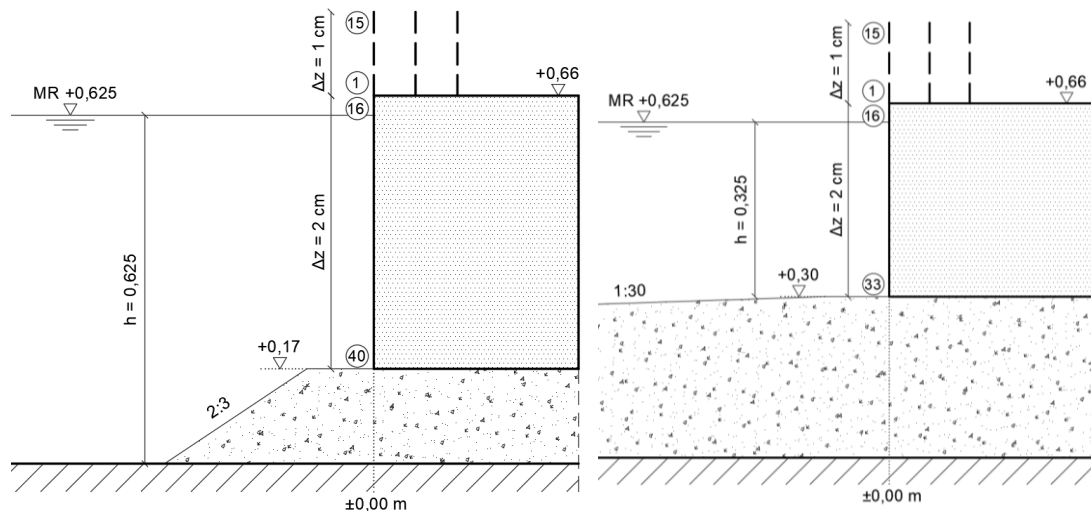
Istraživanjem su obuhvaćene sljedeće konfiguracije parapetnog zida lukobrana:

- $G_{C1} = 0,00$ m - parapetni zid u ravnini,
- $G_{C2} = 0,075$ m - manje uvučeni parapetni zid, internog naziva *prednji*,
- $G_{C3} = 0,15$ m - više uvučeni parapetni zid, internog naziva *srednji*,

pri čemu oznaka G_{Ci} predstavlja udaljenost vanjskog lica parapetnog zida od vanjskog lica trupa lukobrana.

Na Slici 2. prikazana je osnovna geometrija numeričkih modela lukobrana za simulacije 1, 2 i 3 (Slika 2., lijevo) te za simulacije 4, 5 i 6 (Slika 2., desno). Numeričkim istraživanjem analizirano je djelovanje isključivo pravilnih valova u trajanju od 60 sekundi, uz jednake valne parametre za sve simulacije: visinu vala $H = 0,163$ m i period vala $T = 1,5$ s. Udaljenost između početka numeričkog modela i vanjskog lica trupa lukobrana iznosila je 17,5 m. Razina mirne vode održavana je na konstantnoj apsolutnoj visini mjerenoj od dna modela (+0,625 m). Međutim, zbog variranja konfiguracije dna, dubina vode ispred lukobrana (h) mijenjala se u rasponu od 0,232 m do 0,625 m. Posljedično, varirao je i omjer H/h , koji je redom iznosio 0,26, 0,50, 0,60 i 0,70. Vrijednosti omjera H/h u simulacijama 4 – 12 značajno su veće u odnosu na vrijednosti primijenjene u eksperimentalnim istraživanjima te odgovaraju položaju lukobrana u plitkovodnom području. Prema teoriji

solitarnog vala, lom pravilnog vala, uz pretpostavku horizontalnog dna, nastupa pri omjeru visine vala i dubine vode $H/h = 0,78$ (Pršić, 2011). Navedeno upućuje na zaključak da su se valovi u simulacijama 4 – 12, a osobito u simulacijama 10 – 12, približili stanju neposredno prije loma, iako do samog loma nije došlo. Po visini vanjskog lica vertikalnog dijela lukobrana „postavljano“ je između 28 i 40 modelskih tlačnih senzora, ovisno o geometriji lukobrana, kojima su mjereni valni pritisci. Konkretno, na parapetnom zidu, visine $h_w = 0,15$ m, u svakom numeričkom modelu postavljeno je 15 tlačnih senzora na međusobnom razmaku od 0,01 m, dok je na trupu lukobrana, čija je visina u simulacijama varirala u rasponu $h_t = 0,267 - 0,490$ m, postavljeno između 13 i 25 senzora na odstojanju od 0,02 m. Uzgon uslijed djelovanja valova na lukobran nije posebno mjereno u okviru numeričkog istraživanja, već je u naknadnim analizama pretpostavljeno da je tlak uzgona na vanjskoj nožici trupa lukobrana jednak horizontalnom tlaku izmjenenom na najnižem tlačnom senzoru. Istraživanje je provedeno pomoću numeričkog softvera FLOW-3D koji je prethodno verificiran na modelu lukobrana za simulaciju 1 variranjem različitih veličina numeričkih ćelija u modelu.



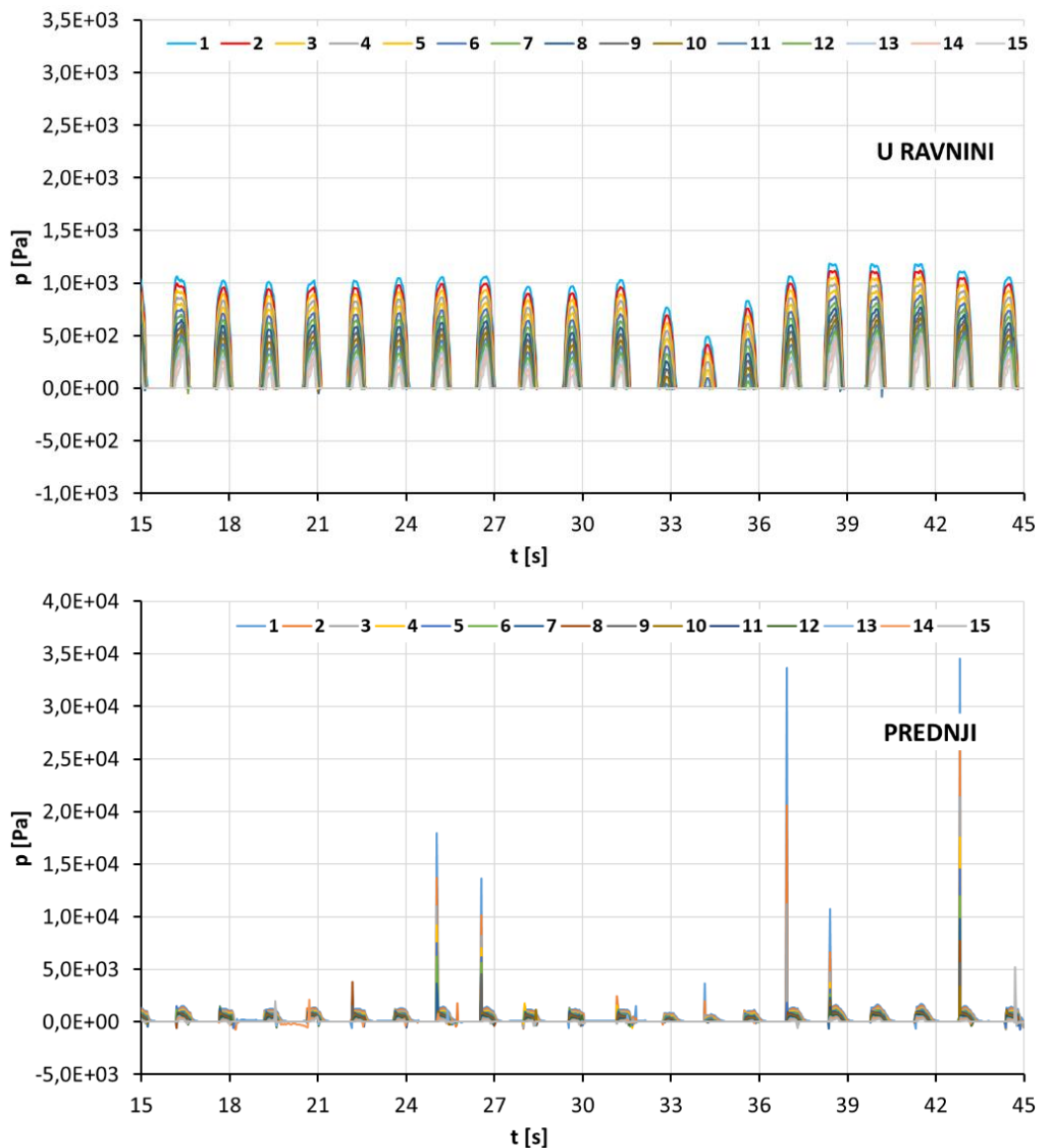
Slika 2. Skice numeričkih modela lukobrana za simulacije 1, 2 i 3 (lijevo) te 4, 5 i 6 (desno)

3 Rezultati

3.1 Dinamika tlakova na parapetni zid lukobrana

Razdioba tlakova uzrokovanih djelovanjem valova na parapetni zid lukobrana analizirana je za slučaj lukobrana s horizontalnim dnom i najvećom dubinom ispred samog lukobrana ($h = 0,625$ m; simulacije 1 - 3). Dinamika tlakova određena je na temelju očitavanja vrijednosti s 15 modelskih tlačnih senzora postavljenih duž visine parapetnog zida lukobrana na međusobnom razmaku od 1 cm. Usporedna analiza valnih pritisaka na parapetni zid, kao i sve daljnje analize u ovom radu, provedena je za vremenski interval od 30 sekundi, između 15. i 45. sekunde simulacija, tijekom kojeg je zabilježeno 20 valova. Analizom gornjeg dijagrama sa Slike 3., utvrđeno je da je kod konfiguracije parapetnog zida u ravnini raspodjela tlakova po visini zida pravilna, pri čemu se maksimalna vrijednost javlja na najnižem modelskom senzoru (oznaka „1“), uz izražen pad pritisaka s porastom visine zida (oznaka „15“ odnosi se na najviši modelski tlačni senzor na zidu). Karakter tlakova je pulsirajući, bez značajnijih zabilježenih negativnih vrijednosti (podtlaka). Za uvučene konfiguracije parapetnog zida raspodjela tlakova po visini zida znatno je nepravilnija, uz jasno izražene impulsne udare. Također, za ove konfiguracije parapetnog zida više nije pravilo da se maksimalni pritisci javljaju pri dnu parapetnog zida, a uz to su lokalno zabilježene i izraženije negativne vrijednosti pritisaka, odnosno podtlak, što se može dovesti u vezu sa širenjem zraka zarobljenog u vodi. Potrebno je naglasiti da se impulsni udari, definirani kao vremenski vrlo kratka, ali intenzivna opterećenja, na pojedinim ili skupini susjednih tlačnih senzora najčešće pojavljuju neposredno prije glavnog udara vala. Takva pojava oblikovno i fenomenološki odgovara pritisacima s dvostrukim vrhom (Lee and Park, 2020; Chen et al., 2015), odnosno pritisacima nalik na

„crkveni krov“ (Romano and Bellotti, 2023). Međusobnom usporedbom uvučenih konfiguracija uočeno je se da su u slučaju *srednje* uvučenog parapetnog zida (simulacija 3) valni pritisci dugotrajniji, što je i očekivano s obzirom na veću dubinu uvlake i posljedično dulje zadržavanje vode ispred zida. Ova je pojava osobito izražena na najnižim tlačnim sensorima. Nadalje, iako je pojava impulsnih udara učestalija kod *srednje* uvučenog parapetnog zida, ekstremne vrijednosti pritisaka veće su kod *prednje* uvučene konfiguracije (simulacija 2). Tako su kod *srednje* uvučenog parapetnog zida zabilježeni ekstremni pritisci i do 7,5 puta veći u odnosu na parapetni zid *u ravnini*, dok su kod manje uvučenog (*prednjeg*) parapetnog zida zabilježene vrijednosti i do gotovo 30 puta veće (Slika 3., dole). Temeljem ovako zabilježenih distribucija tlakova, može se zaključiti da uvlačenje parapetnog zida može imati nepovoljne i neželjene posljedice na konstrukciju lukobrana u obliku kratkotrajnih, ali izrazito visokih impulsnih opterećenja, osobito kod manje uvučenih konfiguracija parapetnog zida.

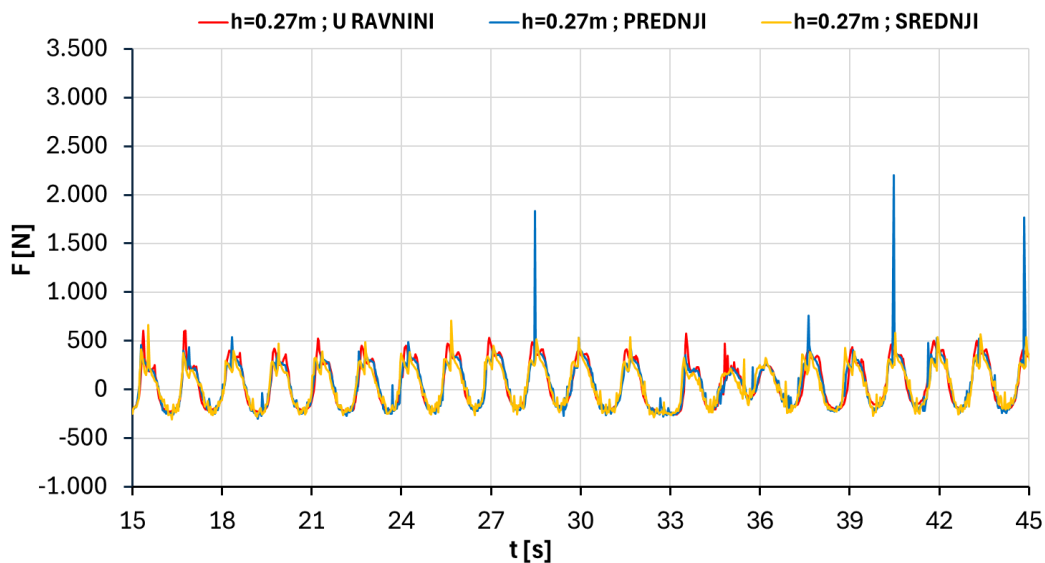


Slika 3. Razdioba tlakova po visini parapetnog zida lukobrana za konfiguraciju parapetnog zida *u ravnini* (gore) i *prednji* (dolje), sve za slučaj lukobrana s horizontalnim dnom $h = 0,625$ m

3.2 Dinamika ukupne (globalne) sile vala na lukobranu

Za svaku od dvanaest simulacija analizirana je dinamika ukupne sile tlaka vala (po m' modelskog lukobrana) u razdoblju od 15. do 45. sekunde simulacija, od vrha parapetnog zida do dna trupa lukobrana, pri čemu je

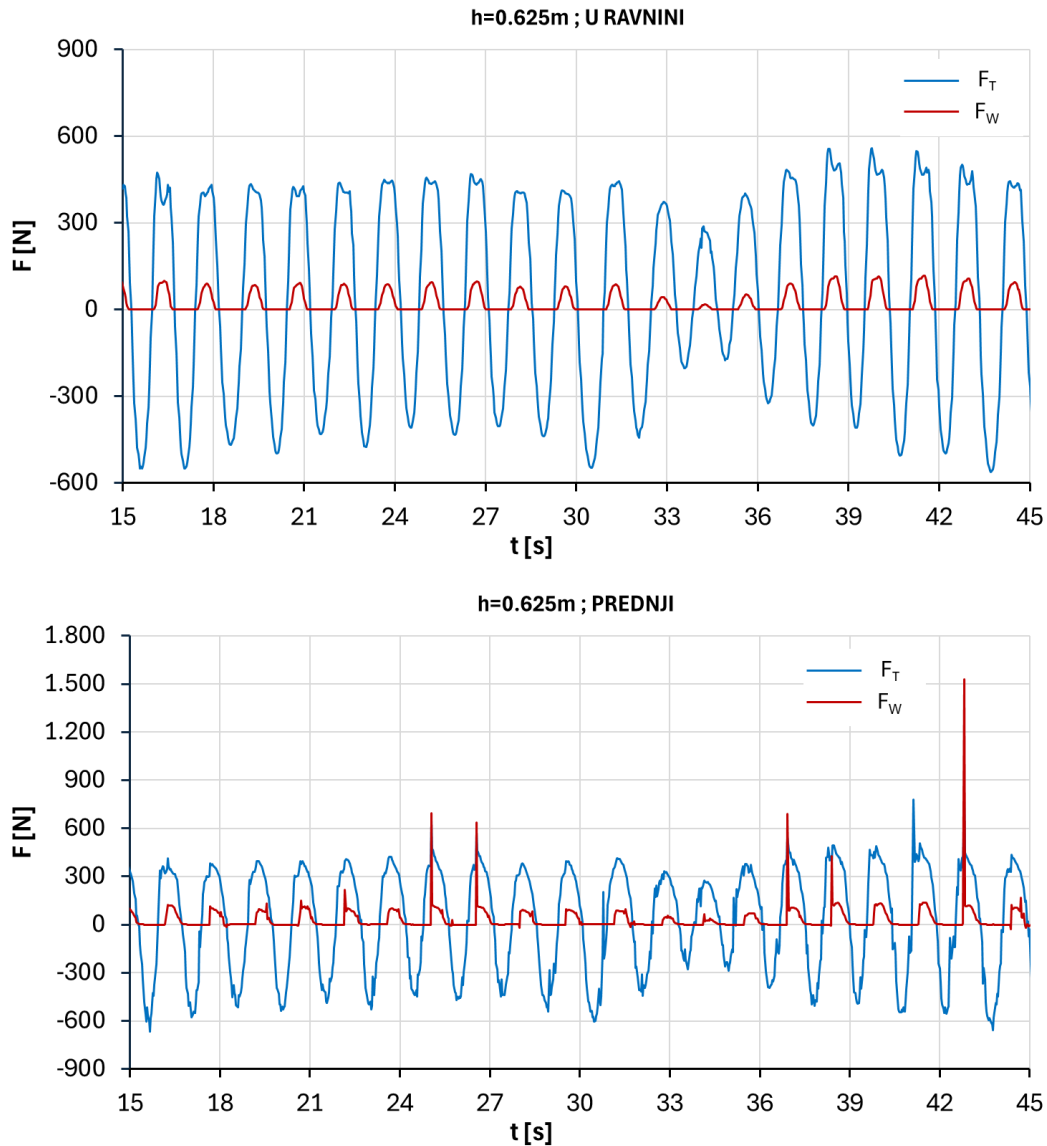
zanemaren doprinos hidrostatskog tlaka. Tlakovi su očitavani u vremenskom koraku od 0,03 s za svaki modelski tlačni senzor, što je rezultiralo s 1000 očitavanja po senzoru tijekom analiziranih 30 sekundi trajanja pojedine simulacije. Kao reprezentativan primjer, na dijagramu na Slici 4. prikazane su ukupne sile tlaka vala za geometrijsku konfiguraciju lukobrana s nagnutim dnom i dubinom vode neposredno ispred lukobrana od $h = 0,270$ m (simulacije 7 – 9). Na dijagramu je ukupna sila vala na lukobran označena različitim bojom, ovisno o položaju parapetnog zida: crvenom bojom prikazana je konfiguracija parapetnog zida *u ravnini*, plavom bojom konfiguracija *prednji*, a žutom bojom konfiguracija *srednji*. Kao što se može vidjeti, intenzivni impulsni udari na lukobran zabilježeni su isključivo kod uvučenih konfiguracija parapetnog zida, pri čemu su češći i intenzivniji u slučaju konfiguracije *prednji*. Ukoliko se zanemare impulsne sile, oblik opterećenja i iznosi ukupnih sila za set simulacija s istom dubinom vode ispred lukobrana vrlo su slični, neovisno o položaju parapetnog zida.



Slika 4. Dinamika ukupne sile tlaka vala na modelski lukobran s dubinom vode ispred lukobrana $h = 0,270$ m (simulacije 7 – 9)

3.3 Dinamika sile vala na trupu i parapetnom zidu lukobrana

Na Slici 5. prikazan je vremenski tijek sile tlaka vala u promatranom intervalu za model lukobrana s horizontalnim dnom ($h = 0,625$ m) te konfiguracije parapetnog zida *u ravnini* i *srednji*, razložen na dvije komponente: silu koja djeluje na trup lukobrana (F_T – plave linije) i silu koja djeluje na parapetni zid (F_W – crvene linije). Konfiguracija najdubljeg modelskog lukobrana ($h = 0,625$ m) izabrana je kako bi se najjasnije prikazale uočene pojave po pitanju djelovanja sile tlaka vala zasebno na trup i parapetni zid lukobrana te utjecaj uvlačenja parapetnog zida na intenzitet istih. Za konfiguraciju parapetnog zida *u ravnini* (Slika 5., gore) vidljivo je da su sile na trup i na parapetni zid općenito pravilnog oblika te vremenski usklađene, odnosno bez faznog pomaka. Manje nepravilnosti u području vrha brijega vala kod sila očitanih na trupu lukobrana posljedica su izdizanja i osciliranja vode iznad trupa lukobrana. Kod plićih konfiguracija lukobrana, navedene pravilnosti oblika više nisu toliko izražene (deformacija valova neposredno ispred lukobrana uslijed ulaska valova u plitkovodno područje), ali su sile koje djeluju na trup i parapetni zid lukobrana i dalje međusobno u fazi. Analizom donjeg dijagrama na Slici 5. (konfiguracija parapetnog zida *prednji*) može se zaključiti da je pojava izrazito intenzivnih impulsnih opterećenja na lukobran dominantno povezana s uvlačenjem parapetnog zida lukobrana i djelovanjem impulsnih opterećenja na sami parapetni zid. Također, kod uvučenih konfiguracija parapetnog zida lukobrana može se jasno uočiti vremenski odmak između sila koje djeluju na trup i onih koje djeluju na parapetni zid, odnosno pojava faznog pomaka između ove dvije komponente sila.



Slika 5. Dinamika sile tlaka vala iskazana preko komponenti F_T i F_W za konfiguraciju lukobrana s dubinom vode $h = 0,625$ m i parapetnim zidom *u ravnini* – simulacija 1 (gore) i *prednji* – simulacija 2 (dolje)

3.4 Vršna opterećenja

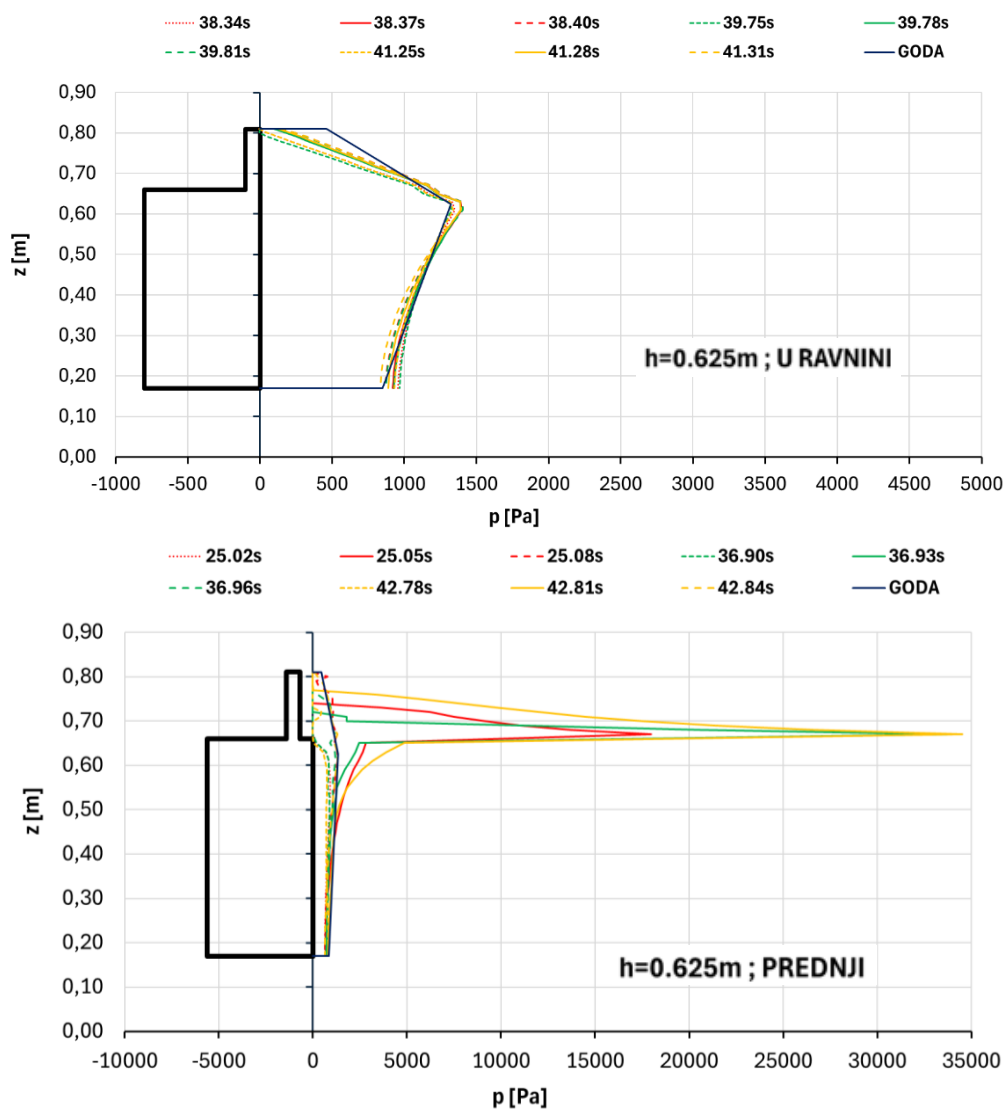
Ovim istraživanjem provedena je i analiza vršnih valnih opterećenja na lukobran za svaku pojedinu simulaciju te su ista uspoređena s analitičkim vrijednostima dobivenima primjenom izraza koje je predložio Goda (Goda, 2010). U promatranom vremenskom intervalu, od 15. do 45. sekunde trajanja simulacija, za tri najintenzivnija vala identificiran je trenutak u kojem je zabilježena maksimalna ukupna sila vala na lukobran. Na temelju te tri vrijednosti određena je prosječna maksimalna sila na lukobran ($F_{G.AM}$), a dodatno je, radi usporedbe, za svaku simulaciju utvrđena i apsolutno maksimalna ukupna sila vala ($F_{G.MM}$). Dobivene vrijednosti prikazane su u Tablici 1. Analitičke vrijednosti valnih opterećenja određene su isključivo za konfiguracije parapetnog zida *u ravnini*, budući da ne postoje izrazi kojima bi se moglo procijeniti opterećenje na vertikalni lukobran s uvučenim parapetnim zidom. Ukupne teoretske sile ($F_{G.G}$) također su prikazane u Tablici 1. Usporedbom prosječnih maksimalnih sila iz numeričkih modela ($F_{G.AM}$) i sila određenih preko analitičkih izraza ($F_{G.G}$) za simulacije s konfiguracijom parapetnog zida *u ravnini* utvrđeno je dobro podudaranje rezultata. Pojedinačna odstupanja manja su od 20 %, dok je u prosjeku odstupanje zanemarivo.

Za simulacije s parapetnim zidom *u ravnini* (simulacije 1, 4, 7 i 10), na temelju prosječne maksimalne sile, određena je minimalna širina lukobrana (B) pri kojoj su faktori sigurnosti na prevrtanje (FS^{PR}) i klizanje (FS^{KL}) jednaki ili neznatno veći od granične vrijednosti $FS^{PR} = FS^{KL} \geq 1,00$. Faktori sigurnosti određeni su prema izrazima, preporukama i parcijalnim koeficijentima propisanim Eurokod normama, pri čemu su radi jednostavnosti prikaza korišteni faktori sigurnosti umjesto stupnja iskoristivosti. Za tako definiranu širinu (B) potom su izračunati faktori sigurnosti i za konfiguracije parapetnog zida *prednji* i *srednji*. Rezultati ove analize prikazani su u Tablici 1., a upućuju na zaključak da su faktori sigurnosti kod lukobrana s uvučenim parapetnim zidovima općenito manji u odnosu na referentne konfiguracije parapetnog zida *u ravnini*. U prosjeku je faktor sigurnosti na prevrtanje (FS^{PR}) manji za 1,25 puta, a faktor sigurnosti na klizanje (FS^{KL}) za 1,36 puta. Međutim, u ekstremnim slučajevima smanjenje faktora sigurnosti iznosi do 2,22 puta za prevrtanje te čak 4,76 puta za klizanje. Nadalje, apsolutno maksimalne sile ($F_{G,MM}$) u odnosu na prosječne maksimalne sile ($F_{G,AM}$) u prosjeku su veće za približno 20 % (u rasponu od 0 do 50 %), što ukazuje na mogućnost pojave i ekstremnijih vrijednosti sila od obrađenih. Zanimljivo je napomenuti da se kod konfiguracija s parapetnim zidom *u ravnini*, smanjenjem dubine vode ispred lukobrana, a samim time i visine lukobrana, povećava potreba za većom širinom lukobrana (B) radi osiguranja potrebne stabilnosti. Naime, smanjenjem ukupne visine lukobrana smanjuje se i masa lukobrana kao jedini stabilizacijski faktor dok je umanjeње maksimalne sile vala sa smanjenjem dubine zanemarivo ili pak dolazi do povećanja zbog ulaska valova u plitkovodno područje.

Tablica 1. Numerička i analitička maksimalna valna opterećenja te faktori sigurnosti lukobrana

Simulac.	Dubina vode ispred lukobr. h [m]	Položaj parapetnog zida	Prosječna max. sila $F_{G,AM}$ [N]	Max. sila $F_{G,MM}$ [N]	Sila po Goda-i $F_{G,G}$ [N]	Širina lukobr. B [m]	Faktor sigurnosti prevrtanje FS^{PR} [/]	Faktor sigurnosti klizanje FS^{KL} [/]
1	0,625	u ravnini	649,04	652,49	659,01	0,358	1,00	1,12
2	0,625	prednji	1.626,49	2.296,82	-	0,358	0,45	0,46
3	0,625	srednji	694,54	817,33	-	0,358	0,95	1,07
4	0,325	u ravnini	547,12	583,83	635,74	0,386	1,07	1,00
5	0,325	prednji	994,94	1.500,19	-	0,386	0,74	0,58
6	0,325	srednji	797,00	870,86	-	0,386	0,80	0,73
7	0,270	u ravnini	594,77	603,62	599,47	0,534	1,15	1,00
8	0,270	prednji	1.935,81	2.205,14	-	0,534	0,65	0,21
9	0,270	srednji	653,42	710,59	-	0,534	1,18	1,12
10	0,232	u ravnini	673,90	777,79	571,33	0,810	1,19	1,00
11	0,232	prednji	584,37	762,11	-	0,810	1,37	1,48
12	0,232	srednji	2.177,43	3.183,75	-	0,810	0,94	0,41

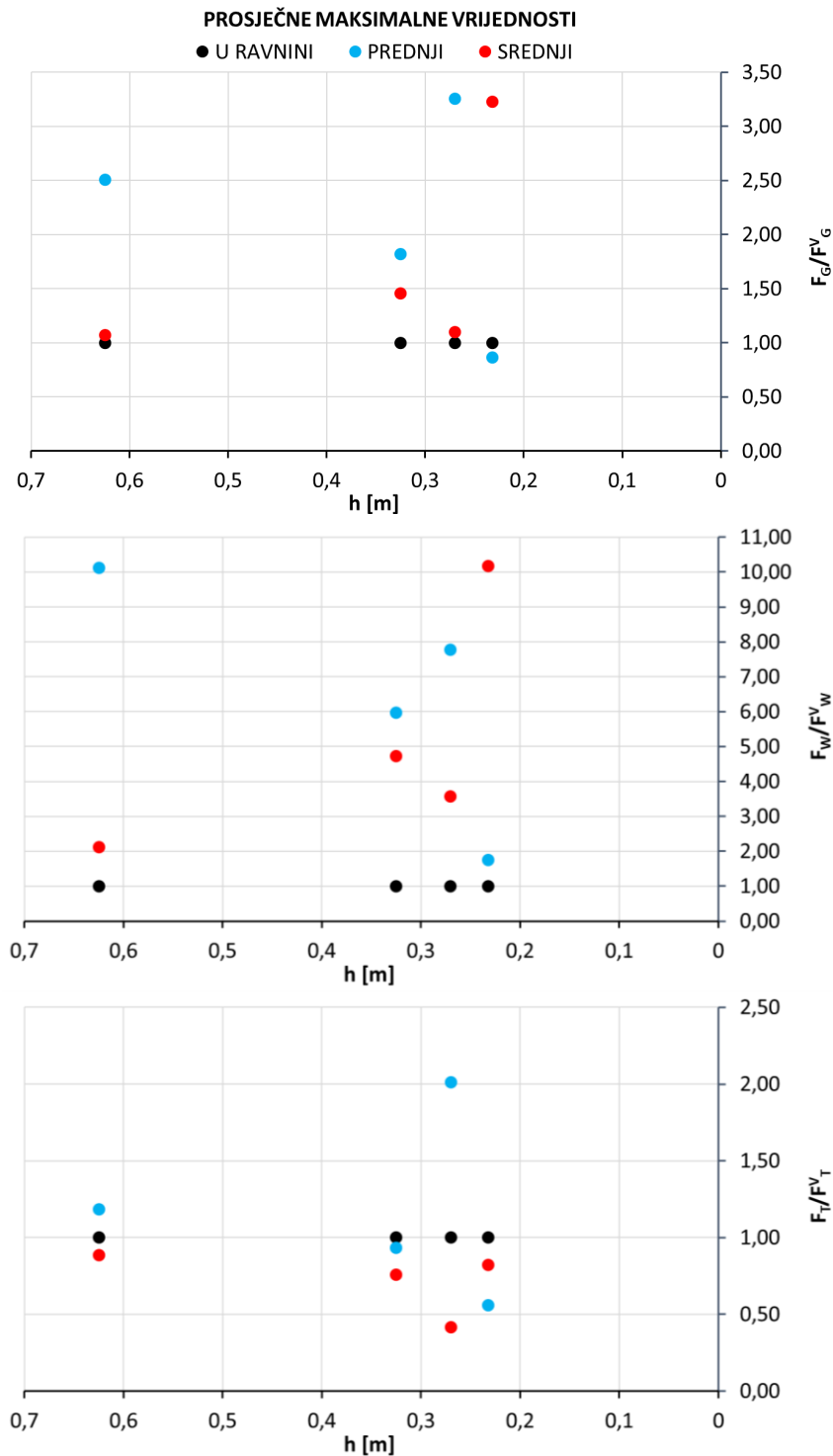
U sklopu ovog istraživanja provedena je i vizualna usporedba izmjerenih opterećenja. Za svaku simulaciju je za tri najintenzivnija vala određen trenutak maksimalne ukupne sile. Reprezentativna distribucije pritisaka po visini lukobrana za te trenutke (pune linije u crvenoj, zelenoj i žutoj boji), kao i neposredno prije i nakon njih (crtkane linije istih boja), prikazane su na Slici 6. za lukobran s horizontalnim dnom i konfiguracijom parapetnog zida *u ravnini* (simulacija 1) i *prednji* (simulacija 2). Za konfiguraciju parapetnog zida *u ravnini* (Slika 6., gore) vidljivo je dobro slaganje numeričkih i teorijskih pritisaka prema Goda-i (tamno plava linija). Nasuprot tome, kod konfiguracije parapetnog zida *prednji* (Slika 6., dolje) vidljive su ekstremne vrijednosti pritisaka na uvučenom parapetnom zidu. Ove vrijednosti lokalno su i do 30 puta veće od teorijskih pritisaka za zid *u ravnini*. Međutim, bitno je za naglasiti kako su ovi impulsi udari izuzetno kratkotrajni ($\leq 0,03$ s) jer u trenucima neposredno prije i nakon udara ekstremne vrijednosti pritisaka nisu prisutne. Istraživanjem nije uočen opći trend povećanja intenziteta tih udara sa smanjenjem dubine ispred lukobrana, no najekstremnije vrijednosti zabilježene su pri najmanjoj dubini $h = 0,232$ m ($H/h = 0,70$).



Slika 6. Distribucija najintenzivnijih valnih pritisaka po visini lukobrana za slučaj horizontalnog dna ($h = 0,625$); parapetni zid u ravnini (gore) i prednji (dolje)

Za kraj je prikazana je grafička usporedba (Slika 7.) prosječnih maksimalnih sila za uvučene konfiguracije parapetnih zidova u odnosu na referentnu konfiguraciju parapetnog zida u ravnini, i to za sve tri komponente sile vala: globalnu silu (F_G), silu na parapetnom zidu (F_W) te silu na trupu lukobrana (F_T). Navedena usporedba konceptualno je vrlo slična analizi koju su proveli Romano i Bellotti u svojem istraživanju (Romano and Bellotti, 2023). Radi omogućavanja izravne i jasne komparacije prosječnih maksimalnih sila koje djeluju na lukobrane s uvučenim parapetnim zidovima u odnosu na lukobran s parapetnim zidom u ravnini, pojedine komponente sile vala za svaku su konfiguraciju normalizirane dijeljenjem s prosječnim maksimalnim vrijednostima globalne sile (F_G^V), sile na parapetnom zidu (F_W^V) i sile na trupu lukobrana (F_T^V) za referentni slučaj parapetnog zida u ravnini, pri istoj dubini vode ispred lukobrana. Vrijednosti prikazane na dijagramima na Slici 7. stoga su bezdimenzionalne i prikazane kao funkcija dubine vode ispred lukobrana (h). Crne, plave i crvene oznake na dijagramima predstavljaju, redom, konfiguracije parapetnog zida: u ravnini, prednji i srednji. Gornji dijagram na Slici 7. odnosi se na ukupne sile (F_G), srednji na sile koje djeluju na parapetni zid (F_W), dok donji prikazuje sile koje djeluju na trup lukobrana (F_T). Analizom ovih dijagrama može se zaključiti da su za uvučene konfiguracije parapetnih zidova prosječne maksimalne ukupne sile vala koje djeluju na lukobran u većini promatranih slučajeva veće. Prosječno povećanje iznosi približno 100 % (dvostruka vrijednost), dok se pri manjim dubinama vode bilježe i do trostruko veće sile (Slika 7., gore). Takvo opažanje u potpunosti je suprotnosti s istraživanjem koje su, za niže vrijednosti omjera H/h , proveli Romano i Bellotti i u kojem je zabilježeno smanjenje globalne sile. Utvrđeno povećanje globalne sile posljedica je isključivo većih

sila na parapetni zid koje se javljaju kod uvučenih konfiguracija (Slika 7., sredina). Povećanja su karakterizirana velikim rasapom vrijednosti te variraju između 70 % i 900 % (od 1,7 do 10 puta veće sile), a mogu se pripisati pojavi impulsnih udara na parapetne zidove. Primjetno je da je za *srednju* konfiguraciju parapetnog zida prosječno povećanje manje nego za *prednju* konfiguraciju, uz napomenu da su za obje konfiguracije zabilježene ekstremne vrijednosti povećanja sile. Sile koje djeluju na trup lukobrana (Slika 7., dolje) pokazuju različite obrasce ponašanja. Za ovu komponentu sile vala zabilježena su i povećanja (do 100 %) i smanjenja (do 60 %) u odnosu na referentnu konfiguraciju s parapetnim zidom *u ravni*.



Slika 7. Bezdimenzionalne globalne sile F_G/F_V^G , sile na parapetnom zidu F_W/F_V^W i sile na trupu lukobrana F_T/F_V^T u funkciji dubine vode ispred lukobrana (h)

4 Zaključak

Ovim radom analiziran je utjecaj uvlačenja parapetnog zida lukobrana na distribuciju i intenzitet valnih opterećenja. Pomoću dvanaest numeričkih modela lukobrana ispitane su tri konfiguracije parapetnog zida za četiri različite geometrijske konfiguracije lukobrana. Kroz provedene simulacije variran je omjer između visine vala i dubine vode ispred lukobrana (H/h) kako bi se postiglo da se lukobran osim u uvjetima relativno duboke vode ispita i za plitkovodno područje. Rezultati ovog preliminarnog numeričkog istraživanja pokazuju da uvlačenje parapetnog zida dovodi do pojave impulsnih opterećenja, koja su učestalija i intenzivnija kod manje uvučenih zidova. Zabilježeni ekstremni pritisci veći su i do 30 puta u odnosu na konfiguraciju lukobrana s parapetnim zidom u ravnini. Najizraženija impulsna opterećenja zabilježena su za najpliću konfiguraciju lukobrana ($H/h = 0,70$), što se može objasniti utjecajem male dubine vode ispred lukobrana koja deformira val i uzrokuje stanje koje predstoji lomu vala. Kod konfiguracija s uvučenim parapetnim zidom uočen je fazni pomak između djelovanja sila na trup i parapetni zid lukobrana. Maksimalne sile određene su kao prosjek triju najvećih vrijednosti te su uspoređene s analitičkim izrazima prema Goda-i. Analiza stabilnosti pokazala je da se uslijed uvlačenja parapetnog zida prosječni faktor sigurnosti na prevrtanje smanjuje 1,25 puta, a na klizanje 1,36 puta, odnosno 2,22 i 4,76 puta u ekstremnim slučajevima. Bezdimenzionalna analiza je pokazala da uvlačenje parapetnog zida u većini slučajeva uzrokuje porast globalnih sila (prosječno oko 100 %, a u plitkoj vodi i preko 200 %), prvenstveno zbog znatnog povećanja sila na parapetnom zidu (70 % – 900 %). Promjene sila na trupu lukobrana bile su varijabilne i bez presudnog utjecaja na ukupnu silu. S obzirom na iznimno kratko trajanje impulsnih opterećenja ($\leq 0,03$ s), nužna su dodatna istraživanja kako bi se utvrdio njihov stvarni utjecaj na globalnu stabilnost i/ili lokalna oštećenja lukobrana.

Literatura

- Chen, X., Hofland, B., Altomare, C., Suzuki, T. and Uijtewaal, W. (2015) Forces on a vertical wall on a dike crest due to overtopping flow, *Coastal Engineering* 95, 94 - 104.
- HRN EN 1997-1:2012/NA:2016, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje - 1. dio: Opća pravila – Nacionalni dodatak.
- Goda, Y. (2010) *Random Seas and Design of Maritime Structures* (3rd Edition), Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 38, World Scientific Publishing Company.
- Lee, B. W. and Park, W-S. (2020) Evaluation of the Hydraulic Performance of a Rear-Parapet Vertical Breakwater under Regular Waves through Hydraulic Experiments, *Water* 2020, 12(9), 2428.
- OCDI (2009) *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*, The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, Japan.
- Oumeraci, H., Kortenhaus, A., Allsop, W., de Groot, M., Crouch, R., Vrijling, H. and Voortman, H., (2001) *Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters*, CRC Press.
- Pršić, M. (2011) *Plovni putevi i luke*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, Dostupno na: www.grad.hr/nastava/hidrotenhika/gf/plovni_putevi_i_luke/predavanja/PPL_Pogl_2_140311.pdf (Preuzeto: 01. listopada 2025.)
- Romano, A. and Bellotti, G. (2023) Wave forces on vertical caissons with retreated wall: A first experimental insight, *Coastal Engineering* 186, 104396.
- Romano, A., Centorami, M., Cecioni, C. and Bellotti, G. (2024): A physical model study on the hydraulic performances of vertical breakwaters with retreated wave walls, *Coastal Engineering* 191, 104539.
- Takahashi, S. (2002): *Design of vertical breakwaters*, Port and Airport Research Institute, Japan, Revised Version of Reference Document No.34, PHRI.
- USACE (2011) *Coastal Engineer Manual, Part VI: Design of Coastal Project Elements (EM 1110-2-1100)*, Change 3, U.S. Army Corps of Engineers.