

Perforirani vertikalni zid kao obalna konstrukcija

Dalibor Carević, Mark Pršić, Ivana Carević

Ključne riječi

perforirana konstrukcija, vertikalni zid, postojeće građevine, laboratorijska istraživanja, refleksijska svojstva, geometrijske karakteristike

Key words

perforated structure, vertical wall, existing structures, laboratory testing, reflective properties, geometrical characteristics

Mots clés

structure perforée, mur vertical, structures existantes, essais en laboratoire, propriétés de réflexion, caractéristiques géométriques

Ключевые слова

перфорированная конструкция, вертикальная стена, существующие сооружения, лабораторные исследования, рефлексивные свойства

Schlüsselworte

perforierte Konstruktion, Vertikalwand, bestehende Bauwerke, Laboruntersuchungen, Reflexeigenschaften, Geometrieckenngrossen

D. Carević, M. Pršić, I. Carević

Pregledni rad

Perforirani vertikalni zid kao obalna konstrukcija

Polazi se od toga da je perforirani vertikalni zid obalna građevina kojom se utječe na veličinu reflektiranih valova, a time i na veličinu valova ispred obale, na prelijevanje preko konstrukcije, opterećenje konstrukcije i eroziju nožice temeljnog nasipa. Prikazane su neke postojeće građevine i laboratorijska istraživanja provedena na perforiranim konstrukcijama radi analize refleksijskih svojstava takvih konstrukcija odnosno njihovih oblikovnih i geometrijskih karakteristika.

D. Carević, M. Pršić, I. Carević

Subject review

Perforated vertical wall as a waterfront structure

It is initially stated that a perforated vertical wall is a waterfront structure which influences the size of reflected waves, and hence the size of waves in front of the coast, the incidence of spilling over the structure, structure loading level, and erosion at foundation level. Authors present some existing structures as well as laboratory testing conducted on perforated structures, in order to analyse reflective properties of such structures, i.e. their characteristics relating to shape and geometry.

D. Carević, M. Pršić, I. Carević

Ouvrage de synthèse

Mur vertical perforé comme une structure côtière

Il est indiqué au début qu'un mur vertical perforé est une structure côtière qui influence la grandeur des ondes réfléchies, et de là, la grandeur des ondes devant la côte, le taux de déversement par dessus de la structure, la charge exercée sur la structure, et l'érosion au niveau des fondation. Les auteurs présentent un nombre des structures existantes ainsi que les essais en laboratoire conduits sur les structures perforées afin d'analyser les propriétés de réflexion de ces structures, c'est-à-dire leurs caractéristiques relatives à la forme et la géométrie.

Д. Царевич, М. Пршич, И. Царевич

Обзорная работа

Перфорированная вертикальная стена в качестве береговой конструкции

Исходится из того, что перфорированная вертикальная стена является береговым сооружением, оказывающая влияние на величину рефлексированных волн, а тем самым и на величину прибрежных волн, на переливание через конструкцию, на нагрузку на конструкцию и эрозию основания фундаментной насыпи. Показаны некоторые существующие сооружения и лабораторные исследования, проведенные на перфорированных конструкциях с целью анализа рефлексивных свойств таких конструкций, их профильных и геометрических характеристик.

D. Carević, M. Pršić, I. Carević

Übersichtsarbeit

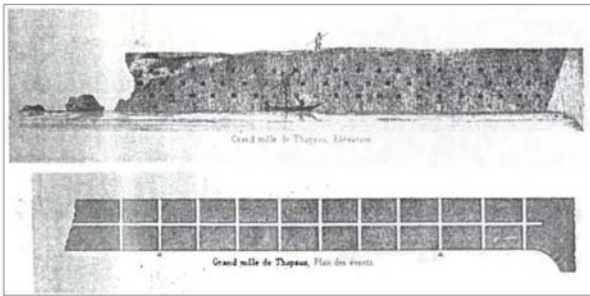
Perforierte Vertikalwand als Küstenkonstruktion

Man geht davon aus dass eine perforierte Vertikalwand eine Küstenkonstruktion ist mit der man die Grösse der reflektierten Wellen beeinflusst, damit auch die Grösse der Wellen vor der Küste, Überschütten der Konstruktion, Belastung der Konstruktion sowie auch die Errosion des Fundamentdammfusses. Dargestellt sind einige bestehende Bauwerke und Laboruntersuchungen durchgeführt an perforierten Konstruktionen wegen der Analyse der Reflexeigenschaften solcher Konstruktionen, bzw. deren Form- und Geometrieckenngrossen.

Autori: Dr. sc. **Dalibor Carević**, mag. ing. aedif.; prof. dr. sc. **Marko Pršić**, dipl. ing. građ.; **Ivana Carević**, mag. ing. aedif., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb

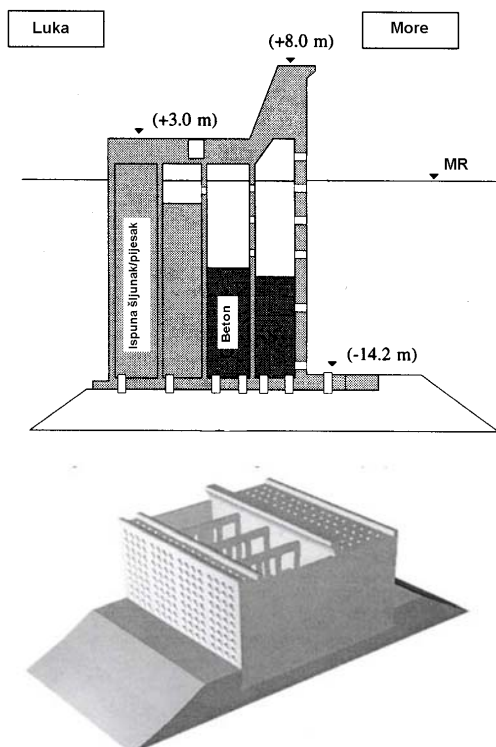
1 Uvod

Prva poznata perforirana konstrukcija izgrađena je u Thapsusu (danas Rass Dimas, Tunis). Bio je to impresivan gat, 259 metara dugačak i 12 metara širok, s otvorima koji su služili za smanjenje udarne sile i refleksije vala. Godine 1869. zabilježen je na crtežu (slika 1.) iz kojeg se vidi da je otprilike 2000 godina nakon izgradnje i dalje bio u relativno dobrom stanju [1].



Slika 1. Crtež perforiranoga gata u Thapsusu (danas Rass Dimas, Tunis)

Ideja o perforiranoj konstrukciji kao sredstvu za smanjenje refleksije i opterećenja od vala mirovala je do 1960. godine kada ju je preuzeo i dalje razvijao Jarlan [2], [3], izgradnjom perforiranog lukobrana u zaljevu Comeau, (Kanada). Zbog toga se takvi tipovi konstrukcija često nazivaju konstrukcijama Jarlanova tipa. U Japanu su sagrađeni perforirani obalni zid u Kobeu 1969. i perforirani lukobran tipa keson u luci Takamatsu, 1970.



Slika 2. Presjek lukobrana u luci Torres na Sardiniji (gore); segment lukobrana u luci Dieppe u Francuskoj (dolje)

Od poznatijih izvedbi perforiranih konstrukcija u Europi treba spomenuti 1990. izgrađen perforirani lukobran u luci Torres na sjeveru Sardinije. Lukobran se sastoji od tri komore različite dubine u odnosu na mirnu razinu (MR), uz izvedbu pravokutnih otvora [4] (slika 2.). Poznat je i perforirani lukobran u luci Dieppe (Seine-Maritime, Francuska), za koji su načinjena opsežna laboratorijska i terenska ispitivanja, [5] (slika 2.). Lukobran je izgrađen 1992. od dvostrukih "Jarlanovih" kesona u ukupnoj duljini 225 m (kesoni 25 x 17 m) i sadrži dvije komore. Komora okrenuta prema pučini nema gornju ploču, za razliku od perforirane komore okrenute prema luci. Također se može spomenuti i perforirani obalni zid u luci Victoria u Hong Kongu koji je sagrađen u svrhu smanjenja agitacije lučkog akvatorija, 1998. [6].

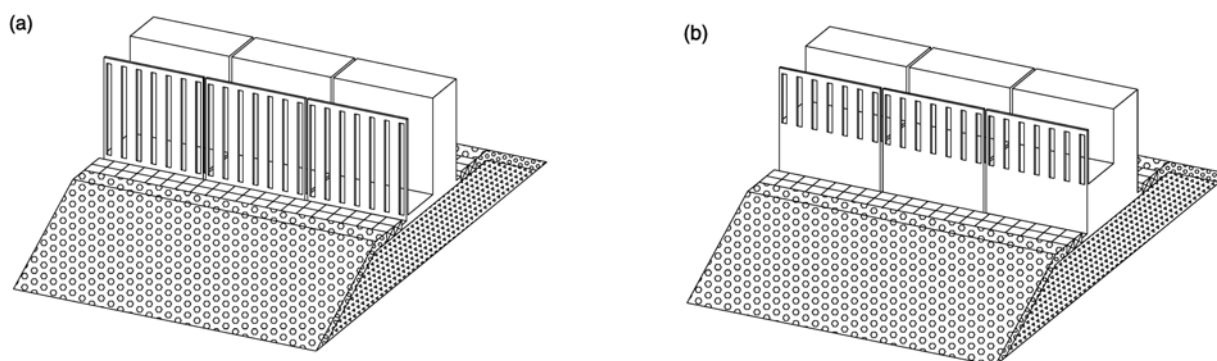
Razvoj proračunskih (analitičkih i numeričkih) modela temeljenih na rezultatima eksperimenata počinje sa uspostavljanjem i primjenom heurističkih modela (Marks i Jarlan [7], Terret [8]). Prvi pokušaj objašnjavanja hidrauličkih fenomena povezanih uz pojedine detalje konstrukcije predstavljen je u radu Richey i Sollit [9]. Detaljniju analitičku razradu problema uveo je Kondo [10]

bazirajući svoj pristup na modelu dugovalne teorije. Na potencijalnoj teoriji baziraju svoje proračunske modele Twu i Lin [11], Fugazza i Natale [12] te Isaacson [13]. Fugazza i Natale izvode analitički model s pravilnim valovima za proračun perforiranih konstrukcija na ravnom dnu, a Suh i Park [14] za potpuno perforirani vertikalni zid na kamenom nasipu. Na osnovi tog rada Suh i suradnici razvijaju matematički model za proračun s nepravilnim valovima i za djelomično perforirani zid [15, 16]. Matematički model za refleksiju od djelomično perforiranog zida na strmom dnu, za pravilne i nepravilne valove, razvio je Liu [17].

2 Osnovni tipovi konstrukcija

Perforirana konstrukcija sadrži disipacijsku komoru koju čine prednji perforirani zid, stražnji nepropusni zid, gornja ploča, poprečni zidovi za ukrućivanje konstrukcije ili grede za ukrućivanje i donja ploča. Svi ti dijelovi čine cjelinu, komoru, koja se ugrađuje kao sastavni dio u neki tip lučke građevine.

Jedan perforirani zid i jedan stražnji nepropusni zid čine jednu komoru perforirane konstrukcije. Ako ima više perforiranih zidova, tada se svaki prostor između dvaju zidova zove komora. Većim se brojem disipacijskih komora smanjuju koeficijenti refleksije, posebice u području kratkih valova za koje vrijedi odnos širine komore B i valne duljine L, $B/L > 0,25$, [4]. Najčešće se rabe konstrukcije sa samo jednom komorom, čija je uobičajena širina $1/10$ do $1/4$ projektne značajne valne duljine L_s .



Slika 3 Primjer perforiranog lukobrana s jednim perforiranim zidom bez gornje ploče. a) potpuno perforirana konstrukcija, b) djelomično perforirana konstrukcija

Disipacija energije odvija se u komori perforirane konstrukcije i u otvorima na zidovima kroz mehanizam turbulencije. Perforirani zid može imati perforacije po cijeloj visini zida (slika 3.a) ili djelomično u zoni vodnog lica gdje su orbitalne brzine vode ispod vala najveće (slika 3.b).

Potreba za djelomično perforiranim konstrukcijama pojavljuje se zbog potrebe povećanja težine konstrukcije i stabilnosti na prevrtanje ili klizanje. Prema obliku, perforacije mogu biti: uzdužni vertikalni otvori, uzdužni horizontalni otvori, kružni otvori, pravokutni otvori i razni drugi oblici otvora. Prema uporabljivosti krune mogu biti s gornjom pločom i bez nje. Perforirani obalni zidovi mogu imati specifične oblikovne karakteristike, npr. sa zidom na kruni lukobrana, s hidrauličkim oblikovanjem komore, s kamenim ispunom komore, sa poprečnim zidovima unutar komore.

Prema svemu navedenom može se zaključiti da se različitim konstrukcijskim kombinacijama može dobiti veliki broj tipova konstrukcija s različitim refleksijskim svojstvima. Složenost disipacijskog mehanizma i njegova ovisnost o konstrukcijskim detaljima perforirane konstrukcije čine takve konstrukcije zahtjevnima za projektiranje te zahtijeva primjenu fizikalnih modela i složena matematičkog aparata.

3 Parametri koji utječu na refleksijske karakteristike

3.1 Utjecaj poroznosti

Pod refleksijskim karakteristikama podrazumijevamo koeficijent refleksije, K_R , od perforiranog zida koji se za nepravilne valove definira prema [18] kao:

$$K_R = \frac{H_{Sr}}{H_{Si}} \quad (1)$$

gdje su:

H_{Si} - dolazna značajna valna visina [m],

H_{Sr} - reflektirana značajna valna visina [m].

Za pravilne je valove koeficijent refleksije definiran kao odnos reflektirane H_r i incidentne valne visine H_i .

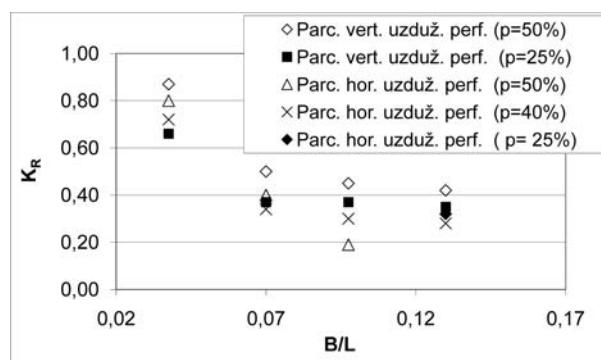
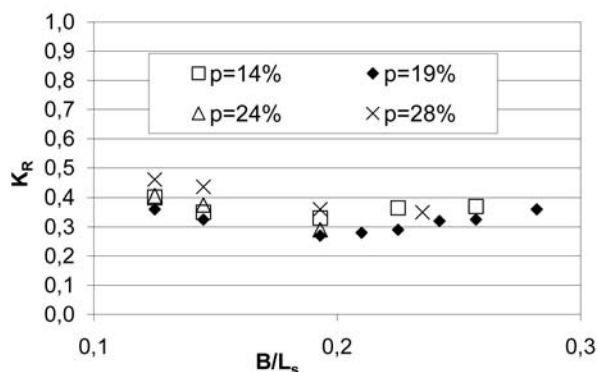
Bez obzira o kojem tipu otvora se radi, parametar koji karakterizira perforirani vertikalni zid je poroznost p , definirana kao:

$$p = \frac{a}{A} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2)$$

gdje su:

a - ukupna ploština otvora na zidu [m^2]

A - ukupna ploština zida [m^2].



Slika 4. Usporedba koeficijentata refleksije nepravilnih valova za različite poroznosti, za dvostruki perforirani zid [19], [20] (lijevo) i usporedba koeficijentata refleksije monokromatskih valova za različite poroznosti i oblike perforacija [21] (desno)

Uobičajene su poroznosti zidova koje se pojavljuju u literaturi od 20 do 35 %. Na perforiranim konstrukcijama sa dva perforirana zida (dvije komore) i poroznostima $p = 14, 19, 24$ i 28 % provedena su eksperimentalna ispitivanja utjecaja poroznosti na refleksijske karakteristike (slika 4., lijevo). Zaključeno je da se dobivaju izjednačene refleksijske karakteristike za sve analizirane poroznosti.

U radu [21], načinjena su eksperimentalna ispitivanja na modelu perforirane konstrukcije sa jednom komorom i monokromatskim valovima. Ispitivane su refleksijske karakteristike za parcijalne vertikalne uzdužne perforacije i parcijalne horizontalne uzdužne perforacije. Uporabljene su poroznosti perforiranog zida, $p = 25$ %, $p = 40$ % i $p = 50$ %. Razlike izmjerenih koeficijenata refleksije za vertikalne i horizontalne perforacije nisu značajne (slika 4., desno). Rezultati provedenog istraživanja pokazali su da poroznost $p=50\%$ (vertikalne uzdužne perforacije) ne daje zadovoljavajuće koeficijente refleksije u odnosu na ostale mjerene poroznosti.

U radu [22] provedena su ispitivanja na laboratorijskom fizikalnom modelu, gdje je variran tip otvora na perforiranom zidu sa horizontalnim uzdužnim, vertikalnim uzdužnim i kružnim otvorima. Zaključeno je da oblici otvora pri istoj poroznosti ne utječu bitno na koeficijent refleksije. Utjecaj oblika otvora, te debljine zida na refleksijske karakteristike ispitivan je u radu [23]. Zaključeno je da je utjecaj zanemariv u odnosu na poroznost i bezdimenzijski parametar B/L .

Na osnovi istraživanja u radu [6] zaključeno je da na refleksijske karakteristike zida, uz poroznost, utječe i gustoća perforacija zida. Drugim riječima, istu poroznost možemo ostvariti s jednim ili s 10 otvora na referentnoj površini pa o tome ovisi i koeficijent refleksije. Što su veće neperforirane cjeline zida, to je od njih veća refleksija u polje ispred zida. Mehanizam disipacije na perforiranom zidu ovisi o "broju" vrtloga u kojima se disipira energija, a "broj" vrtloga ovisi o duljini bridova otvora u zidu od kojih se vrtlozi odvajaju. Cilj je za određenu poroznost postignuti što veću duljinu bridova za odvajanje vrtloga, s tim da se zadovolje konstrukcijski zahtjevi minimalnim dimenzijama perforiranog zida.

3.2 Utjecaj visine perforiranog dijela prema visini neperforiranoga prednjeg vertikalnog zida

Poradi stabilnosti rabe se djelomično perforirane konstrukcije (slika 3.b), odnosno donji dio zida nema perforacija i uobičajeno se izvodi kao puni beton ili s kameonom ili pješćanim ispunom. Za takvu izvedbu očekivalo bi se povećanje koeficijenta refleksije jer dolazi do potpune refleksije od neperforiranog dijela zida. Rezultati eksperimentalnih istraživanja (slika 7.), pokazuju upra-

vo suprotno. Koeficijenti refleksije u slučaju djelomično perforiranog zida [16] manji su u odnosu prema potpuno perforiranom zidu [15], za iste hidrauličke i geometrijske uvjete. Istu tendenciju pokazuju rezultati matematičkog modela iz rada [17]. Takav se odnos rezultata može objasniti time što se u slučaju djelomično perforirane konstrukcije odvija intezivniji proces turbulencija u komori nego kod potpuno perforirane konstrukcije. Ovaj je zaključak pretpostavka i svakako je podložan kritici i eventualnoj raspravi, odnosno zahtijeva dodatna istraživanja kako bi se rasvijetlio utjecaj visine neperforiranog dijela zida na refleksijske karakteristike.

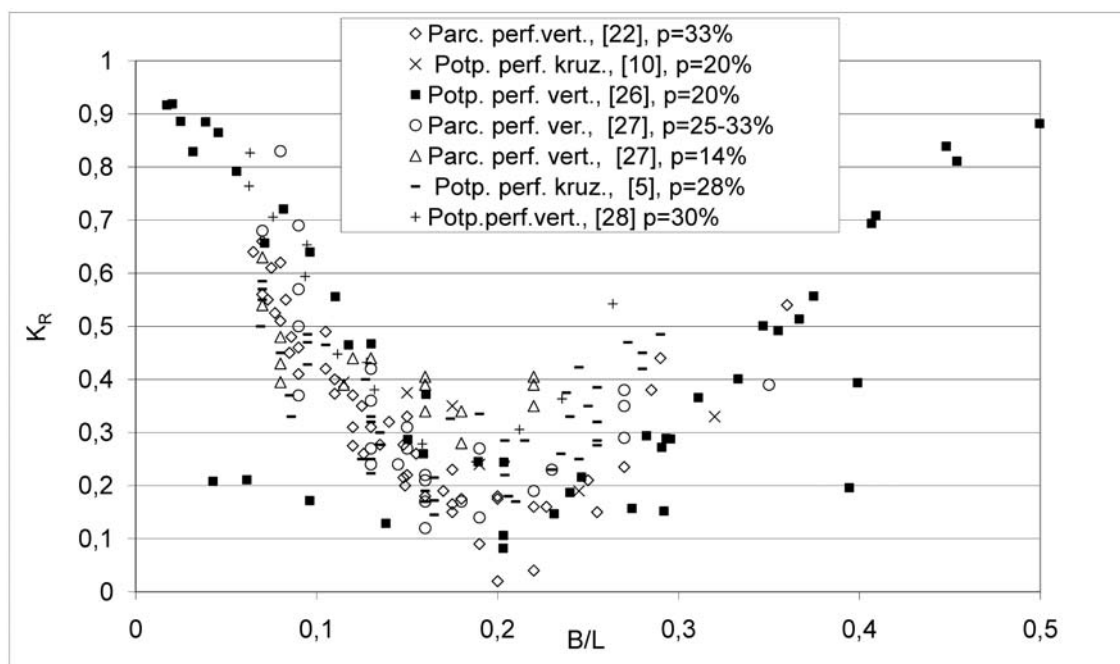
3.3 Utjecaj širine komore B i valne duljine L (B/L)

Parametar koji bitno utječe na refleksijske karakteristike jest parametar B/L . Širina komore B je parametar koji odabire projektant radi postizanja najmanjeg stupnja refleksije od konstrukcije. Ovisnost koeficijenta refleksije K_R o parametru B/L paraboličkog je oblika, a K_R postiže svoj minimum za vrijednosti $B/L \approx 0,2$ za monokromatske valove (slika 5.).

Perforirane konstrukcije bez obzira na to jesu li na temeljnom nasipu ili na ravnom dnu, te jesu li potpuno ili djelomično perforirane, pokazuju slična refleksijska svojstva u ovisnosti o parametru B/L za monokromatske valove.

Za potpuno perforiranu konstrukciju bez utjecaja gornje ploče, koja leži na ravnom horizontalnom dnu, Fugazza i Natale (1992.) [12] teorijski su pokazali da se minimalna refleksija pojavljuje kod odnosa širine komore B i valne duljine monokromatskog vala L , $B/L = (2n + 1)/4$; $n = 0, 1, 2, \dots$ Gledajući s praktične inženjerske strane, širina komore ograničena je s ekonomske strane na najmanju moguću, pa iz toga proizlazi da se minimalne teorijske vrijednosti koeficijenta refleksije ostvaruju pri $B/L = 0,25$, a to je vrlo blisko eksperimentalnim rezultatima prikazanim na slici 5. Da bi se dodatno objasnio utjecaj odnosa B/L na širinu komore daje se primjer širine komore $B = 4$ m, koja osigurava minimalni teorijski koeficijent refleksije za valnu duljinu $L = 16$ m.

Kod refleksije monokromatskog vala od vertikalnoga nepropusnog zida (clapotis), prvi čvor stojnog vala pojavljuje se na udaljenosti $L/4$ od zida. Ako se na toj udaljenosti od vertikalnog zida postavi perforirani zid (pozicija 1, slika 6.), na tom se mjestu pojavljuju najveće horizontalne brzine kroz perforacije zida i samim time ostvaruje se najveća disipacija energije kroz vrtloženje i trenje te se pojavljuje najmanja reflektirana energija. Pozicija 1 predstavlja upravo odnos $B_1/L = 0,25$. Približavanjem pozicije perforiranog zida od pozicije 1 prema stražnjem zidu refleksija se povećava, isto tako i udaljanjem, što rezultira paraboličnom ovisnošću K_R o parametru B/L (slika 5.).



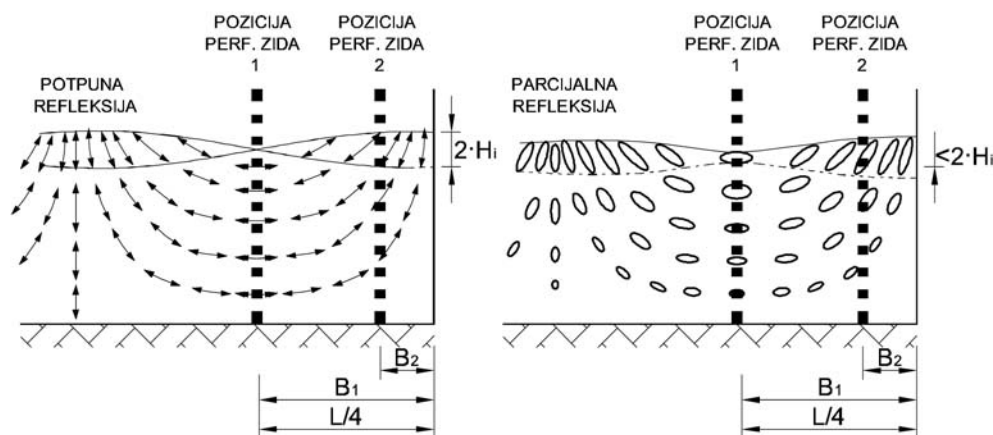
Slika 5. Koeficijenti refleksije za monokromatske valove izmjereni u valnom kanalu; p-poroznost perforiranog zida, B-širina komore, L-valna duljina dolaznog vala

Razlika mjerene vrijednosti $B/L = 0,2$ (slika 5.) i dobivene teorijski $B/L = 0,25$, kako je to objašnjeno u [16], jest zbog zanemarivanja otpora inercije perforiranog zida u teorijskom modelu [12]. Razlika nastaje jer perforirani zid djelomično usporava valove zbog otpora inercije. U takvoj situaciji nastaje razlika kad su valovi unutar i izvan komore te dolazi do pomaka prvog čvora prema unutrašnjosti komore. Pri tome najveća disipacija energije nastaje na manjoj udaljenosti od $L/4$ nego što je dobiveno teorijskim modelom.

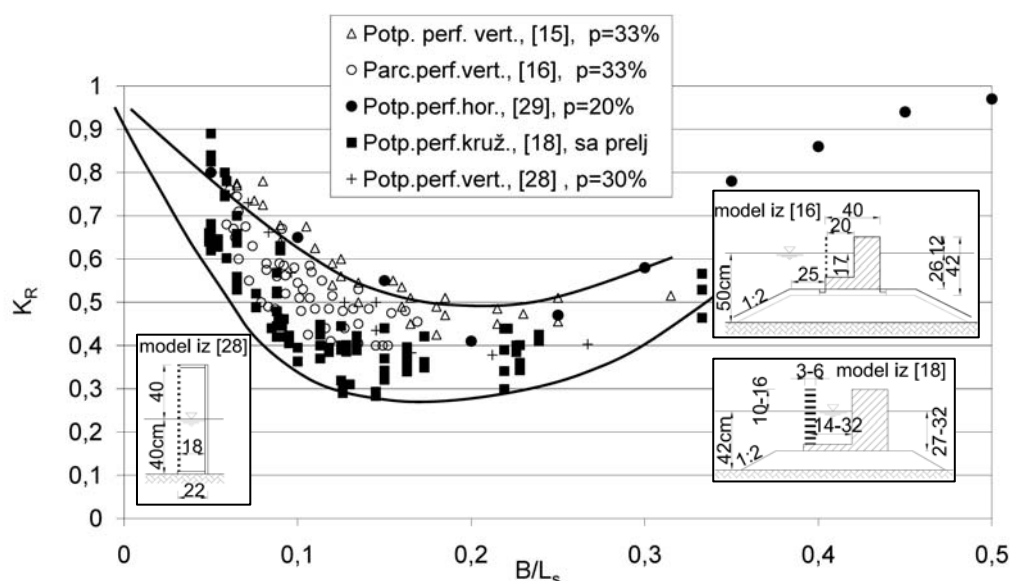
Kod nepravilnih je valova definicija koeficijenta refleksije nešto drukčija nego kod monokromatskih valova (Poglavlje 3.1). Na slici 7. prikazani su izmjereni koefi-

cijenti refleksije za nepravilne valove. Ovisnost koeficijenta refleksije K_R o parametru B/L_s , za nepravilne valove, ima vrlo sličan obrazac ponašanja kao i K_R za pravilne valove. Razlika je u tome što su minimalne vrijednosti koje se pojavljuju kod nepravilnih valova ($K_R \approx 0,3$), a kod pravilnih valova ($K_R \approx 0,1$). Takva je razlika razumljiva s obzirom da kod nepravilnih valova u koeficijent refleksije ulaze sve komponente valnog spektra, pa srednja vrijednost koeficijenta refleksije svih komponenata valnog spektra poprima veću vrijednost.

Na slici 7. može se uočiti da su vrijednosti K_R iz rada [18] najmanje u odnosu na ostale vrijednosti. Razlog tome jest što je omogućeno prelijevanje konstrukcije.



Slika 6. Shematski prikaz trajektorija tečenja ispod stojnog vala s potpunom i parcijalnom refleksijom. Prikaz pozicije 1 perforiranog zida kojoj odgovara najmanja refleksija od perforirane konstrukcije (teorijski $B/L = 0,25$) i pozicije 2 kojoj odgovara veća refleksija



Slika 7. Koeficijenti refleksije za nepravilne valove izmjereni u valnom kanalu; p-poroznost perforiranog zida, B-širina komore, L_s -značajna valna duljina dolaznog vala

Ako se definira parametar R_c/H_s , gdje je H_s dolazna značajna valna visina, a R_c visina od vodnog lica do gornje ploče, rezultati iz rada [18] su imali vrijednosti $R_c/H_s = 0,48-3,2$, za razliku od ostalih mjerenja koja su imala vrijednost parametra $R_c/H_s = \infty$.

Pri projektiranju perforiranih konstrukcija bitno je odabrati širinu komore B koja će za projektne valove, koji su mjerodavni za funkcionalnost, davati najniži koeficijent refleksije. Bez obzira na to koji se tip perforirane konstrukcije primjenjuje, tendencija je da se odabere B u rasponu $B/L_s \approx 0,12 - 0,22$. Time se osigurava najmanja refleksija od perforiranog zida za projektne valove.

3.3.1 Utjecaj gornje ploče konstrukcije

Ako se gradi građevina s uporabnom površinom iznad disipacijske komore, posebnu pažnju treba posvetiti poziciji gornje ploče i njezinu utjecaju na refleksijska svojstva konstrukcije. Ako se gornja ploča nalazi dovoljno nisko, tako da greben vala prilikom refleksije od stražnjeg zida komore dodiruje gornju ploču, dolazi do sprječavanja mehanizma disipacije. Naime, kada je ploča jako nisko, voda iz grebena vala ispuni čitavu komoru i zaustavi osciliranje fizičke površine vode u komori, a samim time i protjecanje kroz perforacije zida. Nastavlja se izdizanje fizičke površine vode izvan komore i dolazi do prelijevanja. Prelijevanje je još jedan fizikalni proces koji utječe na refleksiju tako da je smanjuje jer dolazi do relaksacije dijela valne energije preko krune. Stoga nisko postavljena gornja ploča obuhvaća dva fizikalna procesa: disipaciju energije u komori i prelijevanje, čije zajedničko djelovanje određuje refleksijska svojstva konstrukcije. Funkcijska ovisnost koeficijenta

refleksije u slučaju nisko postavljene krune još nije dovoljno istražena.

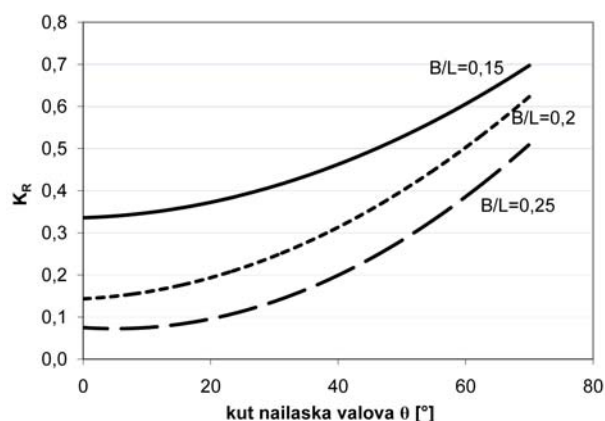
3.3.2 Utjecaj temeljnog nasipa

Za dolazne valove temeljni nasip predstavlja naglo smanjivanje dubine ispred konstrukcije. Veličina utjecaja temeljnog nasipa ovisi o nagibu, širini i visini berme temeljnog nasipa te dubini vode. Najutjecajniji su parametri visina berme d_b i dubina vode d . U radu [14] provedena su ispitivanja na numeričkom modelu za valove okomito usmjerene na lukobran, dubinu vode $d = 10$ m, za poroznost $p = 30\%$, monokromatske valove visine $H = 2$ m i period $T = 8$ s. Ustanovljeno je da najveće povećanje koeficijenta refleksije $\sim 13\%$ nastaje pri odnosu $d_b/d = 0,5$ i nagibu pokosa berme 1:1. Za sve odnose $0 < d_b/d < 0,5$ dobiveno je manje povećanje koeficijenta refleksije što je za inženjerske kriterije zanemarljiva veličina.

3.3.3 Utjecaj kuta nailaska valova

U realnim uvjetima valovi će na konstrukciju nailaziti pod različitim kutovima, ovisno o vjetrovnoj klimi. Hidraulički odziv perforirane konstrukcije ovisi o kutu nailaska valova. Najbolji hidraulički odziv, odnosno najmanje koeficijente refleksije konstrukcija daje za okomiti nailazak valova na konstrukciju ($\theta = 0^\circ$). Povećanjem kuta nailaska smanjuje se efekt disipacije energije kroz perforacije te dolazi do povećanja koeficijenta refleksije.

Promjena koeficijenta refleksije (slika 8.) pri varijaciji kuta nailaska valova i vrijednosti parametra B/L definirana je u radu [14] na osnovi numeričkog modela s monokromatskim valovima.



Slika 8. Povećanje koeficijenta refleksije K_R , za diskretne vrijednosti $B/L = 0,15, 0,2$ i $0,25$, zbog promjene kuta nailaska valova na valobran [14]

Gornji su dijagrami načinjeni za situaciju bez poprečnog zida unutar komore koji služi za ukrućenje konstrukcije. Zid za ukrućenje izaziva refleksiju valova unutar komore i dodatno može povećati koeficijente refleksije kada valovi dolaze pod kutom na konstrukciju. Opća preporuka je projektirati grede za ukrućenje ili u poprečnim zidovima predvidjeti otvore.

4 Opterećenje konstrukcije

Prema [4], preporuka za smanjenje udarnih sila na vertikalne valobrane jest primjena perforiranih konstrukcija. Kod perforiranih konstrukcija dolazi do redukcije opterećenja poradi dvaju osnovnih razloga: 1., redukcija valne visine uslijed disipacije energije na perforiranom zidu ima za posljedicu manje sile na konstrukciju i 2., zbog vremenske razlike djelovanja grebena vala na perforirani zid i na stražnji nepropusni zid ukupna je horizontalna sila na konstrukciju reducirana.

Proračun opterećenja perforiranih konstrukcija može se provesti prema dvije metode: 1. metoda redukcije dolazne valne visine [30] i 2., metodom redukcije sile na konstrukciju [31]. U oba se pristupa primjenjuje metoda razvijena za vertikalne zidove bez perforacija (Goda, [18]). U prvom se pristupu dolazna valna visina reducira koeficijentom koji je u funkciji koeficijenta refleksije i potom se proračun vrši prema Godinu modelu. U drugom pristupu se u Godin model "ubacuju" posebni koeficijenti kojima se definira perforirana konstrukcija te se provodi proračun opterećenja. Metoda redukcije sile na konstrukciju je opširnija i kvalitetnije verificirana te daje veće vrijednosti opterećenja na konstrukciju. Stoga se i preporučuje za primjenu u inženjerskoj praksi.

Nisko postavljena gornja ploča komore može predstavljati negativan utjecaj što se tiče sila na konstrukciju. Nailaskom grebena vala u komoru i izdizanjem fizičke površine vode u komori, dolazi do zarobljavanja određenog volumena zraka, koji potom biva komprimiran u

ugao komore te se zbog toga stvaraju impulsi sila. Utjecaj gornje ploče na opterećenje obrađen je u radovima [32], [33], i [34]. Jedan od načina da se ublaže pojave impulsnih sila jest zaobljavanje uglova čime se ostvaruje povratni tok vode i ublažavanje udara vode. Preporučuje se također i primjena otvora kojima se može smanjiti sila na gornju ploču od 25 % do 50 % [6], [35].

5 Zaključak

Perforirane su konstrukcije svi tipovi vanjskih i unutrašnjih lučkih građevina koje imaju ugrađenu disipacijsku komoru radi smanjivanja refleksije valova od konstrukcije. S obzirom na velik broj oblikovnih mogućnosti takvih konstrukcija, one mogu davati različite refleksijske odzive i karakteristike. Stoga su u ovom radu prikazani osnovni utjecajni parametri na koje treba obratiti pozornost prilikom proračuna i projektiranja takvih građevina.

Preporučuje se primjena poroznosti prednjeg zida od 14 do 35 %. Utjecaj visine neporiranog dijela konstrukcije na refleksijske karakteristike nije dovoljno istražen, pa se preporučuje da se uzima takva minimalna visina neporiranog dijela zida da budu zadovoljeni zahtjevi stabilnosti konstrukcije. Ako je visina perforiranog dijela manja od visine neporiranog dijela potrebno je načiniti eksperimentalna ispitivanja takve konstrukcije da bi se definirala refleksijska svojstva. Najznačajniji je parametar odnos širine komore i značajne valne duljine projektne vala o kojem bitno ovise refleksijske karakteristike perforiranog zida. Pri projektiranju takvih konstrukcija bitno je odabrati širinu komore B koja će za projektne valove zadovoljavati uvjet $B/L_s \approx 0,12 - 0,22$, čime će se osigurati najmanja refleksija od perforiranog zida za projektne valove. Ako je kruna obale nisko postavljena tako da omogućuje prelijevanje, mehanizam disipacije u slučaju valova koji se prelijevaju djelomično je onemogućen, ali se prelijevanjem ostvaruje relaksacija dijela valne energije preko krune što u konačnici rezultira povoljnim refleksijskim svojstvima. U slučaju kosog nailaska valova na perforiranu konstrukciju dolazi do povećanja refleksije. Za monokromatske valove prosječni minimalni koeficijent refleksije (iz raspona $B/L = 0,15 - 0,25$) za kut nailaska valova 0° iznosi $\overline{K_R} = 0,2$, za kut nailaska 45° iznosi $\overline{K_R} = 0,35$ i za kut nailaska 70° $\overline{K_R} = 0,6$. Kod nepravilnih valova ove vrijednosti koeficijentata refleksije još su veće.

Perforirane su konstrukcije tipovi antirefektivnih obala koje su posebno pogodne za jadransku međuotočnu valnu klimu u kojoj dominiraju valovi manjih valnih visina odnosno valnih duljina. Relativno mali hod oscilacija morskih razina neće bitnije izmijeniti projektirane koeficijente refleksije. Za manje su valove potrebne i manje

dimenzije komore (širina komore B) što ima povoljan ekonomski efekt. Primjena takvih konstrukcija na izložnim dionicama lučkih obala smanjuje ukupnu agitaciju bazena, a ujedno se te dionice mogu iskoristiti za privez, što je prednost u odnosu na antirefektivne konstruk-

cije tipa nasip. Troškovi primjene ovakvih konstrukcija mogu se smanjiti patentiranjem građevnih elemenata perforiranih konstrukcija i standardizacijom proizvodnje čime bi se takvi tipovi konstrukcija mogli primjenjivati kao predgotovljeni armiranobetonski elementi.

LITERATURA

- [1] Nicholas, C. Kraus: *History and heritage of coastal engineering*, Sept 1996.
- [2] Jarlan, G. E.: (1961), *A perforated vertical wall breakwater*, The Dock and Harbour Authority, XII (486), 394-398,
- [3] Jarlan, G. E. (1965): *The application of acoustic theory to the reflective property of coastal engineering structure*, DME/NAE Quarterly Bulletin N. 1965 Nat. Res. Council of Canada
- [4] Oumeraci, H.; Kortenhaus, A.; Allsop, W.; De Groot, M.; Crouch, R.; Vrijling, H.; Voortman, H.: *Probabilistic design tools for vertical breakwaters*, A. A. Balkema Publishers; February (2001); 134-156
- [5] Bélorgey, M.; Rousset J. M.; Carpentier G.: *Perforated breakwaters, dieppe harbour jarlan caisson: general schedule and acquired experience*, Proceedings of The Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii, USA, May 25–30, 2003; International Society of Offshore and Polar Engineers; (2003).
- [6] McConnell, K.J.; Ethelston, D.M.; Allsop, N.W.H.: *Development of new structures and application in hong kong; Coastlines, structures and breakwaters*, Thomas Telford, London, (1998)
- [7] Marks, M., Jarlan, G. E. (1968), *Experimental study on a fixed perforated breakwater*, Proc. 11th Coastal Engineering Conference, III, ASCE, 1121-1140,
- [8] Terret, F. L., Osorio, J. D. C., Lean, G. H., (1968), *Model studies of a perforated breakwater*, Proc. 11th Coastal Engineering Conference, III, ASCE, 1104-1120,
- [9] Richey, E. P.; Sollitt, C. K.: *Wave attenuation by porous walled breakwater*; Proc., (1970), ASCE, 3, 643-663
- [10] Kondo, H.: *Analysis of breakwater having two porous walls* Coastal Structures '79., II, ASCE, (1979).; 962-977.
- [11] Twu, S. W.; Lin, D. T.: (1991), *On a highly effective wave absorber*, Coastal Engineering 15, 389-405,
- [12] Fugazza, M.; Natale, L.: *Hydraulic design of perforated breakwaters*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol. 118, No. 1, (1992)
- [13] Isaacson, M., Premasiri, S., Yang, G., (1998), "Wave interaction with vertical slotted barrier", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Div., ASCE 124, 118-126.
- [14] Suh, K. D.; Park, W. S.: *Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters*, Coastal Engineering 26, (1995), 177–193
- [15] Suh, Kyung Doug; Choi, Jae Chun; Kim, Bum Hyung; Park, Woo Sun; Lee, Kil Seong: *Reflection of irregular waves from perforated-wall caisson breakwaters*; Coastal Engineering 44 (2001); 141-151
- [16] Suh, Kyung-Duck; Park, Jae Kil; Park, Woo Sun: *Wave reflection from partially perforated-wall caisson breakwater*; Ocean Engineering 33 (2006), 264-280.
- [17] Liu, Y., Li, Y., Teng, B, Xia, Z.: *The reflection of regular and irregular waves by a partially perforated caisson breakwater on a step bed*, Acta Oceanologica Sinica, (2009), Vol. 28, no. 4, p.107-117
- [18] Goda, Y.: *Random seas and design of maritime structures*, 2nd edn. World Scientific, Singapore., (2000), 443 pp.
- [19] Allsop, N. W. H; Hettiarachichi S. S. L.: *Reflection from coastal structures*; Proc 21st ICCE, ASCE, Malaga, (1988); 782-794
- [20] Allsop, N. W. H; Hettiarachichi S. S. L.: *Wave reflections in harbours: design, construction and performance of wave absorbing structures*; Report OD 89, HR Wallingford, (1989)
- [21] Takahashi, S.; Kotake, Y.; Fujiwara, R.; Isobe, M.: *Performance evaluation of perforated wall-caissons by vof numerical simulations*; Coastal engineering 2002. Vol 2.; Proceedings of the 28th International Conference; Jane McKee Smith, pp. 1364-1376
- [22] Park, W.S., Chun, I.S., Lee, D.S.: *Hydraulic experiments for the reflection characteristics of perforated breakwaters*; Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers 5 (3); 1993.; 198–203 (in Korean, with English abstract).
- [23] Allsop, N. W. H; McBride M.W.; Colombo, D.: *The reflection performance of vertical walls and 'low reflection' alternatives – results of random wave flume tests*; Paper to the 3th, Emmelord, (1994)
- [24] Suh, Kyung-Duck; Park, Jae Kil; Park, Woo Sun: *Wave reflection from partially perforated-wall caisson breakwater*; Ocean Engineering 33 (2006), 264-280.
- [25] Suh, Kyung Doug; Choi, Jae Chun; Kim, Bum Hyung; Park, Woo Sun; Lee, Kil Seong: *Reflection of irregular waves from perforated-wall caisson breakwaters*; Coastal Engineering 44 (2001); 141-151
- [26] Zhu, S.; Chwang, A.: *Investigations on the reflection behaviour of a slotted seawall*; Coastal Engineering 43 (2001); 93–104
- [27] Tanimoto, K.; Yoshimoto, Y.: *Theoretical and experimental study of reflection coefficient for wave dissipating caisson with a permeable front wall.*, Report Port & Harbour res. Inst., Japan, Volume 21, Issue 3, Sep. 1982, p.43-77., 1982 (in Japanese)
- [28] Carević, D.: *Hidraulička interakcija valoloma i perforiranog valobrana*, disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, studeni 2009.
- [29] Bergman, H.; Oumeraci, H.: *Hydraulic performance of perforated structures*, Proceedings 5th COPEDEC, Cape Town, April 1999, pp. 1340-1349
- [30] Canel, M.: *Dissipative monolithic breakwaters: some aspects of hydrodynamics*, Final Proceedings, MAST II, MCS-Project: Monolithic (Vertical) Coastal Structures, Alderney, U.K., Paper 4.11, 34 pp.
- [31] Tabet-Aoul, E. H.; Belorgey, M.: *Progress report iv – new calculation method of horizontal forces on perforated caisson*, Proceedings 2nd Overall Project Workshop, (1998), MAST III, PROVERBS-Project: Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters, Naples, Italy, Class 2 Report, Chapter 1.8a), 8pp.
- [32] Takahashi, S. Tanimoto, K. Miyanağa, S.: *Uplift wave forces due to compression of enclosed air layer and their similitude law*, Coastal Engineering Journal, Volume 28, (1985), Pages 191-206
- [33] Chen, X.; Li, Y., Wang, D. Liu, Y., Ma, B., Jiang, J.: *Study for the horizontal wave forces and their overturning moment on perforated caissons with upper structure*, Proceedings of the Seventh 2006 ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, ISOPE PACOMS 2006, (2006), Pages 282-287
- [34] Chen, X., Li, Y., Teng, B.: *Numerical and simplified methods for the calculation of the total horizontal wave force on a perforated caisson with a top cover*, Coastal Engineering, Volume 54, Issue 1, (2007), Pages 67-75
- [35] Androžec, V.; Carević, D.; Pušić, V.: *Hydraulic characteristics of vertical perforated sea wall*, Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection / Damiani ; Leonardo; Mossa, Michele (ur.). - Bari, Italy : Nuova Bios , 2008. 19-23 (ISBN: 978-88-6093-046-0).