SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET Kačićeva 26, 10000 Zagreb

# HIDRAULIČKA INTERAKCIJA VALOLOMA I PERFORIRANOG VALOBRANA

# DISERTACIJA

Dalibor Carević, dipl.ing.građ.

studeni, 2009.

#### HIDRAULIČKA INTERAKCIJA VALOLOMA I PERFORIRANOG VALOBRANA

Broj svezaka: 1

Dalibor Carević, dipl.ing.građ.

Disertacija se prijavljuje na Sveučilištu u Zagrebu, Građevinski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, Hrvatska

Istraživanje je provedeno na Sveučilištu u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, Laboratorij za hidrotehniku.

Prosudbeno povjerenstvo:

Prof.dr.sc. Marko Pršić, dipl.ing.građ. Prof.dr.sc. Valdimir Andročec, dipl.ing.brod. Prof.dr.sc. Izvor Grubišić, dipl.ing. brod.

Disertacija se prijavljuje za ispunjenje uvjeta za stjecanje stupnja doktora znanosti iz područja Građevinarstva, grane Hidrotehnika.

U Zagrebu, studeni 2009. godine

Izdavač: Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet Kačićeva 26 10000 Zagreb Hrvatska

Istraživanje je provedeno u sklopu znanstveno istraživačkog projekta "Utjecaj okoliša na oblikovanje i dimenzioniranje vodnih građevina", (082-0822994-2175), voditelja prof.dr.sc. Marka Pršića, dipl.ing.građ.

U izradi rada su sudjelovali slijedeći studenti: Tomislav Šalamun, Jelena Dasović, Filip Bujan i Tomislav Duvnjak, laborant Franjo Živković i stručni suradnik Velimir Pušić.

#### Sadržaj:

1	Perforira	ana vertikalna konstrukcija	16
	1.1 Osr	ovne definicije i pojmovi	16
	1.2 Pod	ljela perforiranih konstrukcija	19
	1.3 Par	ametri koji utječu na hidrauličku funkcionalnost (refleksijske	
	karakterist	ike) i hidrauličko opterećenje	20
	1.3.1	Utjecaj poroznosti i oblika perforacija na refleksijske karakteristike	22
	1.3.2	Utjecaj visine perforiranog dijela prema visini neperforiranog prednjeg	g
	vertikaln	og zida	25
	1.3.3	Utjecaj širine komore B i valne duljine vala L (B/L)	25
	1.3.4	Utjecaj gornje ploče konstrukcije	31
	1.3.5	Utjecaj temeljnog nasipa	33
	1.3.6	Utjecaj kuta nailaska valova	35
	1.3.7	Utjecaj strmosti valova	37
	1.3.8	Utjecaj balasta unutar komore	40
	1.3.9	Utjecaj geometrijskog oblikovanja konstrukcije	42
	1.4 Ispi	tivanja "in-situ"	43
	1.4.1	Lukobran u luci Dieppe	43
	1.4.2	Lukobran u luci Torres	45
	1.4.3	Utjecaj modela	46
	1.5 Mat	ematički proračunski modeli za hidrauličku funkcionalnost i hidrauličko	C
	opterećenj	e	48
	1.5.1	Analitički matematički modeli	48
	1.5.1.	1 Hidraulička funkcionalnost	48
	1.5.	1.1.1 Pravilni valovi	49
	1.5.	1.1.2 Nepravilni valovi	56
	1.5.1.2	2 Hidrauličko opterećenje	62
	1.5.	1.2.1 Oscilirajuće opterećenje	66
	1.5.2	Empirijski matematički modeli	73
	1.5.2.	1 Hidraulička funkcionalnost	73
	1.5.2.2	2 Hidrauličko opterećenje	74
2	Valolom		76
	2.1 Def	inicija valoloma	76
	2.2 Fun	ikcija valoloma	79
	2.2.1	Interakcija valoloma sa valovima, strujama i nanosom	79
	2.3 Tra	nsmisija valova	84
	2.3.1	Valolomi sa kamenom oblogom	85

	2.3.2 Val	olomi sa glatkom oblogom	87
	2.4 Spektra	Ina deformacija uslijed transmisije valova	88
	2.4.1 Dis	tribucija valne visine nakon loma u plitkom području	90
	2.5 Refleksi	ija valova	91
	2.6 Stabilno	ost valoloma	94
3	Cilj istraživa	nja	97
	3.1 Perforira	ani valobran	98
	3.1.1 Hid	raulička funkcionalnost	98
	3.1.2 Hid	rauličko opterećenje	98
	3.2 Valolom	۱	99
	3.2.1 Hid	raulička funkcionalnost	99
	3.2.2 Hid	rauličko opterećenje	100
	3.3 Hidrauli	čka interakcija perforiranog valobrana i valoloma	100
	3.3.1 Hid	raulička funkcionalnost	100
	3.3.2 Hid	rauličko opterećenje	102
4	Istraživanje.		105
	4.1 Opis istr	raživanja za hidrauličku funkcionalnost	105
	4.1.1 Per	forirani valobran	106
	4.1.1.1	Odabir matematičkog modela za analizu hidrauličke funkcio	nalnosti
		107	
	4.1.1.2	Eksperimentalna istraživanja – fizikalni model	107
	4.1.1.3	Kalibracija matematičkog modela pomoću rezultata fizikalno	g
	modela	114	
	4.1.2 Val	olom	117
	4.1.2.1	Odabir matematičkog modela za analizu hidrauličke funkcio	nalnosti
		118	
	4.1.2.2	Eksperimentalna istraživanja – fizikalni model	119
	4.1.2.3	Kalibracija matematičkog modela pomoću rezultata fizikalno	g
	modela	121	
	4.1.3 Inte	erakcija perforiranog valobrana i valoloma	125
	4.1.3.1	Odabir matematičkog modela za analizu hidrauličke funkcio	nalnosti
		125	
	4.1.3.2	Eksperimentalna istraživanja – fizikalni model	130
	4.1.3.3	Verifikacija novog matematičkog modela pomoću rezultata	
	fizikalnog	modela	133
	4.1.4 Ispi	itivanje utjecaja udaljenosti valoloma od perforiranog valobrar	na na
	fizikalnom m	odelu	138
	4.2 Opis istr	raživanja za hidrauličko opterećenje	140
	4.2.1 Per	forirani valobran	142

5

4.2.1.1	Odabir matematičkog modela za analizu hidrauličkog optereće 142	enja
4.2.1.2	Eksperimentalna istraživanja – fizikalni model	142
4.2.1.3	Kalibracija matematičkog modela pomoću rezultata fizikalnog	
modela	144	
4.2.2 Va	lolom	147
4.2.3 Inte	erakcija perforiranog valobrana i valoloma	149
4.2.3.1	Odabir matematičkog modela za analizu hidrauličkog optereće	enja
	149	
4.2.3.2	Eksperimentalna istraživanja – fizikalni model	154
4.2.3.3	Verifikacija novog matematičkog modela pomoću rezultata	
fizikalnog modela154		
4.2.4 Isp	itivanje utjecaja udaljenosti valoloma od perforiranog valobrana	na
fizikalnom m	nodelu	157
Zaključak		159

Popis slika:

Slika 1	Prikaz perforirane konstrukcije sa jednim i dva perforirana zida 17
Slika 2	Primjer perforiranog valobrana (lukobrana) sa jednim perforiranim zidom na
	kamenom nasipu bez gornje ploče 18
Slika 3	Segment lukobrana na temeljnom nasipu s prikazom osnovnih djelova
	perforirane konstrukcije ugrađene u lukobran, bez gornje ploče
Slika 4	a) Primjer potpuno perforine konstrukcije, b) Primjer djelomično perforirane
	konstrukcije
Slika 5	Koeficijent refleksije K <sub>R</sub> za dvostruki perforirani zid u funkciji parametra B/L,
	[18] i [19]
Slika 6	Koeficijenti refleksije monokromatskih valova. U funkciji parametra B/L.
	Usporedba za različite poroznosti i oblike perforacija, [22]
Slika 7	Profili brzina ispod grebena vala za različite valne visine i duljine prema
	Airy-evoj teoriji
Slika 8	Koeficijenti refleksije za pravilne valove za djelomično perforiranu
	konstrukciju na temeljnom nasipu; p=33%; [2], [11]
Slika 9	Shematski prikaz trajektorija tečenja ispod stojnog vala sa potpunom i
	djelomičnom refleksijom, te pozicija 1 perforiranog zida kojoj odgovara
	namanja refleksija od perforirane konstrukcije (teorijski B/L=0,25) i pozicija 2
	kojoj odgovara veća refleksija 27
Slika 10	Koeficijenti refleksije K <sub>R</sub> , prema jednadžbi (3), za nepravilne valove za
	djelomično perforiranu konstrukciju na temeljnom nasipu, (Slika 8), p=33%,
	[2], [11]
Slika 11	Koeficijenti refleksije $K_{R,}$ prema jednadžbi (3), za nepravilne valove za
	potpuno perforiranu konstrukciju s kružnim otvorima [17], [20] i [23] 29
Slika 12	Ispitivana konstrukcija koja je modelski ispitivana (Mj1:20) sa nepravilnim
	valovima predviđena u luci Victoria Harbour Hong Kong
Slika 13	Koeficijenti refleksije $K_R(f)$ za nepravilne valove za potpuno perforirani
	vertikalni zid s vertikalnim uzdužnim otvorima i bermom [21]
Slika 14	Shematski prikaz perforiranog keja sa nisko postavljenom pločom
Slika 15	a) Presjek modela ispitivanog u elaboratu [11], b) Presjek modela
	ispitivanog u elaboratu [49]
Slika 16	Usporedba rezultata iz modela [11] i modela [49], za pravilne valove 33
Slika 17	Prikaz geometrijskih parametara temeljnog nasipa koji utječu na hidrauličke
	karakteristike perforirane konstrukcije
Slika 18	Utjecaj temeljnog nasipa na koeficijent refleksije, [42]

Slika 19	Ovisnost koeficijenta refleksije, K <sub>R</sub> , o kutu nailaska valova $\theta$ [°], okomiti smjor pojlaska valo pripada kutu $\theta = 0^{\circ}$ [42], za strmost valo H/I = 1/120 36
Slika 20	Sinjei naliaska vala pripada kutu 0–0, [42], za stimost vala $n/L = 1/120$ 30 Povećanje koeficijenta reflekcije K <sub>-</sub> za diskretne vrijednosti R/I =0.15, 0.2 j
	0.25 uslied promiene kuta pailaska valova na valobran [42]
Slika 21	Utional strmasti $H/I$ monokromatskih valova na kooficijont roflekcije $K_{-}$
SIIKA Z I	
	[10]
	Otječaj strinosti, $H_s/L_s$ , nepravinin valova na koencijent reneksije, $K_R$ , [7]. 39
Slika 23	Presjek dva tipa modela kesona u luci Dieppe Seine-Maritime, Francuska,
	M:1:25; A-modellrani presjek identican izvedenom lukobranu, B-
	ekperimentalni presjek, također ispitivan. Poroznost p=28%, kruzne
	40 perforacije, [12]
Slika 24	Koeficijent refleksije $K_R$ u funkciji odnosa B/L za presjek sa balastom, (Slika
	23 A), i presjek bez balasta, (Slika 23 B), [12], monokromatski valovi 41
Slika 25	Primjer osrednjenog polja brzine za jedan valni period, unutar komore
	vertikalne perforirane konstrukcije, [12] 42
Slika 26	Lukobran sa perforiranom konstrukcijom u luci Dieppe, Seine-Maritime,
	Francuska
Slika 27	Poprečni presjek lukobrana u luci Dieppe
Slika 28	Segment perforiranog zida, od kojeg je građen lukobran u luci Dieppe 44
Slika 29	Presjek lukobrana u luci Torres na Sardiniji45
Slika 30	Gradnja perforiranog lukobrana u luci Torres, Sardinija
Slika 31	Ovisnost tlaka P1/10 i Hs na modelu i prototipu na stražnjem nepropusnom
	zidu kesona na mjernom instrumentu w5 (Slika 27), odnosno P03 (Figure
	11)
Slika 32	Skica perforiranog valobrana za proračun koeficijenata refleksije 50
Slika 33	Skica perforiranog valobrana za proračun koeficijenata refleksije
Slika 34	Razlika između udarnog i pulsirajućeg opterećenja, [10]
Slika 35	Mapa tipova opterećenja vertikalnih valobrana prema tipu konstrukcije [10].
Slika 36	Specifikacija valnog opterećenja za vertikalne konstrukcije
Slika 37	Dijagrami opterećenja (ispod grebena) na vertikalni zid za proračun prema
	Godinu postupku
Slika 38	Dijagrami vršnog opterećenja (ispod grebena) na perforirani zid i na stražnji
	zid perforirane konstrukcije
Slika 39	Skica perforiranih konstrukcija za primjenu empirijske jednadžbe (109) 75
Slika 40	Primjeri tlocrta i poprečnih presjeka valoloma
Slika 41	Hidrodinamički procesi na valolomu
Slika 42	Ilustracija formiranja obale
Slika 43	Ilustracija potpunog i nepotpunog taloženja sedimenta

Slika 44	Prikaz formiranih potpunih i nepotpunih sprudova iza valoloma na umjetnoj
_	plaži Pedregalejo, Malaga, Spanjolska 81
Slika 45	Valovima inducirane struje iza izronjenog valoloma bez transmisije valova
	preko konstrukcije
SIIKa 46	valovima inducirane struje kod uronjenog valoloma sa transmisijom valova
0.0	pieko kiulle valoiollia
Slika 47	Nizvodna erozija i uzvodno talozenje uzrokovano formiranjem sprudova
	Veleter ee weerieren krugen
Slika 48	Valoiom sa uronjenom krunom
Slika 49	Valoiom sa krunom iznad MR
Slika 50	Valolom sa bermama
Slika 51	Valolom bez bermi
Slika 52	Definincija oznaka za valolom
Slika 53	Utjecaj kuta nailaska valova na transmisiju za valolome sa glatkom
Slika 51	Diogoni
Slika 54 Slika 55	Prenoručena metoda proračuna deformacije transmitiranog valnog spektra
Slika JJ	preko valoloma sa glatkom oblogom [63]
Slika 56	Karakteristični valne visine Hur, Hur, Hur, Hur, Hur, Za proračunate H
Slika JU	$H_{\rm max}$ induced the maximum (117) i (119)
Slika 57	$\Gamma_{T_r}$ prema jeunauzbama ( $\Gamma_r$ ) $\Gamma(\Gamma_r)$
Slika 57	
Slika 58	Koeficijent redukcije, fr, koeficijenta refleksije za uronjene valolome sa
	kamenom oblogom
Slika 59	Usporedba koeficijenata stabilnosti za razne autore. [24]
Slika 60	Definicija hidrauličkog opterećenja perforiranog valobrana. Prikaz dijagrama
	tlakova ispod grebena vala u različitim trenutcima
Slika 61	Definicija problema
Slika 62	Definicijska skica hidrauličke funkcionalnosti međudjelovanja valoloma i
	perforiranog valobrana za pravilne (monokromatske) valove
Slika 63	Definicijska skica hidrauličke funkcionalnosti međudjelovanja valoloma i
	perforiranog valobrana za nepravilne (spektralne) valove
Slika 64	Definicijska skica hidrauličkog opterećenja interakcije valoloma i
	perforiranog valobrana za pravilne (monokromatske) valove103
Slika 65	Definicijska skica hidrauličke stabilnosti međudjelovanja valoloma i
	perforiranog valobrana za nepravilne (spektralne) valove104
Slika 66	Shema istraživanja hidrauličke funkcionalnosti interakcije perforiranog
	valobrana i valoloma

Slika 67	Uzdužni presjek i tlocrt valnog kanala Hidrotehničkog laboratorija
	Građevinskog fakulteta u Zagrebu108
Slika 68	Motor i ploča generatora Slika 69 Napajanje i servo uređaj109
Slika 70	Digitalni servo kontroler Slika 71 Upravljačka jedinica109
Slika 72	Rezultati baždarenja mjerne opreme, odnosno mjerenja koeficijenta
	refleksije od vertikalnog zida za pravilne i nepravilne valove
Slika 73	Usporedba teorijskog i mjerenog incidentnog JONSWAP spektra za valove
	$H_s$ =0,06m i $T_p$ =1,01s, (Inter1-6 su definirane u poglavlju 4.1.3.2)112
Slika 74	Uzdužni presjek valnog kanala sa smještajem modela perforiranog
	valobrana i kapacitivnih sondi113
Slika 75	Prikaz modela perforiranog valobrana smještenog u valnom kanalu za
	ispitivanje hidrauličke funkcionalnosti (refleksijskih karakteristika)113
Slika 76	Fotografija modela perforiranog valobrana prije ugradnje u kanal114
Slika 77	Usporedba koeficijenata refleksije $K_R$ dobivenih eksperimentalno i teorijski
	za koeficijent kontrakcije Cc=0,8, za pravilne valove; B širina komore
	perforiranog valobrana; L-valna duljina115
Slika 78	Usporedba koeficijenata refleksije $K_R$ dobivenih eksperimentalno i teorijski
	za koeficijent kontrakcije Cc=0,7, za nepravilne valove; B širina komore
	perforiranog valobrana; $L_s$ -značajna valna duljina116
Slika 79	Usporedba empirijskih koeficijenata transmisije, $K_T$ , za valolome sa glatkom
	oblogom, (jednadžba (113)) i sa kamenom oblogom, (jednadžba (116)), iste
	geometrije; F-dubina na valolomu, [m], B <sub>v</sub> -širina krune valoloma, [m], $lpha$ -kut
	nagiba pokosa118
Slika 80	Uzdužni presjek valnog kanala sa smještajem modela valoloma i
	kapacitivnih sondi za uronjenost krune F=0,06m120
Slika 81	Uzdužni presjek valnog kanala sa smještajem modela valoloma i
	kapacitivnih sondi za uronjenost krune F=0,1m
Slika 82	Prikaz modela valoloma za ispitivanje hidrauličke funkcionalnosti
	(transmisijskih karakteristika), za uronjenost krune valoloma, F=0,06m, i
	F=0,1m121
Slika 83	Model valoloma postavljen u kanal121
Slika 84	Usporedba koeficijenata transmisije dobivenih eksperimentalno i pomoću
	empirijske jednadžbe (116) i kalibracija empirijskog modela za primjenu za
	pravilne valove122
Slika 85	Usporedba koeficijenata transmisije dobivenih eksperimentalno i teorijski
	pomoću kalibrirane empirijske jednadžbe (127), za pravilne valove123
Slika 86	Usporedba koeficijenata transmisije dobivenih eksperimentalno i teorijski
	pomoću empirijske jednadžbe (116), za nepravilne valove124
Slika 87	Oznake geometrijskih parametara perforiranog zida127

Slika 88	Uzdužni presjek valnog kanala sa smještajem modela perforiranog valobrana i valoloma za udaljenost valoloma od valobrana. L₀=6.2m i
	uronjenost valoloma F=0,06m, (Inter1)
Slika 89	Uzdužni presjek valnog kanala sa smještajem modela perforiranog
	valobrana i valoloma za udaljenost valoloma od valobrana, L₀=2,4m i
	uronjenost valoloma F=0,06m, (Inter2)
Slika 90	Uzdužni presjek valnog kanala sa smještajem modela perforiranog
	valobrana i valoloma za udaljenost valoloma od valobrana, L <sub>p</sub> =1,2m i
	uronjenost valoloma F=0,06m, (Inter3)
Slika 91	Uzdužni presjek valnog kanala sa smještajem modela perforiranog
	valobrana i valoloma za udaljenost valoloma od valobrana, L₀=1,2m i
	uronjenost valoloma F=0,1m, (Inter4)
Slika 92	Uzdužni presjek valnog kanala sa smještajem modela perforiranog
	valobrana i valoloma za udaljenost valoloma od valobrana, L <sub>p</sub> =2,4m i
	uronjenost valoloma F=0,1m, (Inter5)
Slika 93	Uzdužni presjek valnog kanala sa smještajem modela perforiranog
	valobrana i valoloma za udaljenost valoloma od valobrana, L <sub>p</sub> =6,2m i
	uronjenost valoloma F=0,1m, (Inter6)133
Slika 94	Verifikacija novog matematičkog modela za pravilne valove (poglavlje
	4.1.3.1), pomoću rezultata fizikalnog modela (poglavlje 4.1.3.2)134
Slika 95	Verifikacija novog matematičkog modela za nepravilne valove (poglavlje
	4.1.3.1), pomoću rezultata fizikalnog modela (poglavlje 4.1.3.2)135
Slika 96	Primjer teorijskog i izmjerenog valnog spektra reflektiranog od perforiranog valobrana. Inter1
Slika 97	Primier teoriiskog i izmierenog valnog spektra reflektiranog od perforiranog
	valobrana. Inter2
Slika 98	Primjer teorijskog i izmjerenog valnog spektra reflektiranog od perforiranog
	valobrana, Inter5
Slika 99	Primjer teorijskog i izmjerenog valnog spektra reflektiranog od perforiranog
	valobrana, Inter6
Slika 100	Utjecaj udaljenosti valoloma od valobrana, L <sub>p</sub> , za pravilne valove138
Slika 101	Utjecaj udaljenosti valoloma od valobrana, L <sub>p</sub> , za nepravilne valove139
Slika 102	Shema istraživanja hidrauličkog opterećenja interakcije perforiranog
	valobrana i valoloma141
Slika 103	Prikaz modela perforiranog valobrana sa rasporedom tlakmjera, (T1-T8), za
	ispitivanje hidrauličkog opterećenja143
Slika 104	Ugrađeni tlakomjeri na stup perforiranog zida, pogled sa stražnje strane. 144

Slika	105	Primjer tlakova dobivenih mjerenjem na perforiranom valobranu bez
		valoloma i tlakova dobivenih pomoću teorijskog modela, (poglavlje 1.5.1.2.1,
		[46]), za pravilne valove, H=0,1m i T=1,45s145
Slika	106	Usporedba mjerenih tlakova na tlakomjerima T1-T8 na perforiranom
		valobranu bez valoloma, i vrijednosti teorijskog modela, (poglavlje 1.5.1.2.1,
		[46]), za parametre pravilnih valova iz tablice: Tablica 4145
Slika	107	Usporedba mjerenih tlakova na tlakomjerima T1-T8 na perforiranom
		valobranu bez valoloma, i vrijednosti teorijskog modela, (poglavlje 1.5.1.2.1,
		[46]), za parametre nepravilnih valova iz tablice:Tablica 5146
Slika	108	Verifikacija novog matematičkog modela za pravilne valove
		(poglavlje4.2.3.1), pomoću rezultata fizikalnog modela (poglavlje4.2.3.2). 155
Slika	109	Verifikacija novog matematičkog modela za nepravilne valove
		(poglavlje4.2.3.1), pomoću rezultata fizikalnog modela (poglavlje4.2.3.2). 155
Slika	110	Utiecaj udaljenosti valoloma od valobrana, L <sub>p</sub> , za pravilne valove
Slika	111	Utiecaj udaljenosti valoloma od valobrana, L <sub>p</sub> , za nepravilne valove158
Slika	112	Usporedba valnih visina H <sub>sup</sub> /H <sub>i</sub> , za djelovanje vertikalnog gravitacijskog
		punog valobrana, (Slika 116), za interakciju valoloma i vertikalnog
		gravitacijskog punog valobrana, (Slika 117) i za interakciju valoloma i
		perforiranog valobrana, (Slika 118); F-uronjenost valoloma, (F=0,06m),
		širina komore B=0,18m, monokromatski valovi, " O" – mjerenja, " ·····" –
		(H <sub>sup</sub> /H <sub>i</sub> ) <sub>1.1</sub> i (H <sub>sup</sub> /H <sub>i</sub> ) <sub>0.9</sub>
Slika	113	Usporedba valnih visina H <sub>sup</sub> /H <sub>i</sub> , za djelovanje vertikalnog gravitacijskog
		punog valobrana, (Slika 116), za interakciju valoloma i vertikalnog
		gravitacijskog punog valobrana, (Slika 117) i za interakciju valoloma i
		perforiranog valobrana, (Slika 118), F-uronjenost valoloma, <b>(F=0,1m)</b> , širina
		komore B=0,18m, monokromatski valovi, " O" – mjerenja, " ·····" – (H <sub>sup</sub> /H <sub>i</sub> ) <sub>1.1</sub>
		i (H <sub>sup</sub> /H <sub>i</sub> ) <sub>0.9</sub>
Slika	114	Usporedba valnih visina H <sub>s-sup</sub> /H <sub>i</sub> , za djelovanje vertikalnog gravitacijskog
		punog valobrana, (Slika 116), za interakciju valoloma i vertikalnog
		gravitacijskog punog valobrana, (Slika 117) i za interakciju valoloma i
		perforiranog valobrana, (Slika 118), F-uronjenost valoloma, <b>(F=0,06m)</b> ,
		širina komore B=0,18m, monokromatski valovi, " O" – mjerenja, " ·····" –
		(H <sub>sup</sub> /H <sub>i</sub> ) <sub>1.1</sub> i (H <sub>sup</sub> /H <sub>i</sub> ) <sub>0.9</sub> 164
Slika	115	Usporedba valnih visina H <sub>s-sup</sub> /H <sub>i</sub> , za djelovanje vertikalnog gravitacijskog
		punog valobrana, (Slika 116), za interakciju valoloma i vertikalnog
		gravitacijskog punog valobrana, (Slika 117) i za interakciju valoloma i
		perforiranog valobrana, (Slika 118), F-uronjenost valoloma, <b>(F=0,1m)</b> , širina

komore B=0,18m, monokromatski valovi, " O" – mjerenja, " ·····" – (H <sub>sup</sub> /H <sub>i</sub> ) <sub>1.1</sub>
i (H <sub>sup</sub> /H <sub>i</sub> ) <sub>0.9</sub> 166
Slika 116 Prikaz vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, u funkciji pristanišne
obale167
Slika 117 Prikaz interakcije valoloma i vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, u
funkciji pristanišne obale167
Slika 118 Prikaz interakcije valoloma i perforiranog valobrana, u funkciji pristanišne
obale168
Slika 119 Prikaz vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, u funkciji urbane obale.
169
Slika 120 Prikaz interakcije valoloma i vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, u
funkciji urbane obale169
Slika 121 Prikaz interakcije valoloma i perforiranog valobrana, u funkciji urbane obale.
169

Popis tablica:

Tablica 1	Koeficijenti u jednadžbi (108), [17]
Tablica 2	Karakteristične bezdimenzionalne valne visine
Tablica 3	Ograničenja parametara koji utječu na hidrauličku funkcionalnost
	perforiranog valobrana106
Tablica 4	Valni parametri korišteni za ispitivanje hidrauličke funkcionalnosti
	perforiranog valobrana za pravilne (monokromatske) valove111
Tablica 5	Valni parametri korišteni za ispitivanje hidrauličke funkcionalnosti
	perforiranog valobrana za nepravilne (spektralne) valove, JONSWAP
	spektar
Tablica 6	Ograničenja parametara koji utječu na funkcionalnost valoloma, (oznake
	prema slici: Slika 52)117
Tablica 7	Komparacija troškova izgradnje, visine obale i agitacije bazena za različite
	varijante obalnih konstrukcija sa slika (Slika 116), (Slika 117) i (Slika 118).
	168
Tablica 8	Komparacija troškova izgradnje, visine obale i agitacije bazena za različite
	varijante obalnih konstrukcija sa slika (Slika 119), (Slika 120) i (Slika 121).
Tablica 8	168 Komparacija troškova izgradnje, visine obale i agitacije bazena za različite varijante obalnih konstrukcija sa slika (Slika 119), (Slika 120) i (Slika 121).

169

# Uvod

Obalne građevine su smještene na granici između mora i kopna da bi koristile za prijelaz ljudi ili roba s mora na kopno i obrnuto te za zaštitu akvatorija. Da bi se odvijao nesmetani prijelaz ljudi ili roba potrebno je osigurati dovoljno mirno more ispred obale radi mirnoće plovila i osigurati nepreljevanje krune radi sigurnosti na obali. Također je potrebno osigurati stabilnost obalne građevine radi sigurnosti mehanizacije, a posebice ljudskih života. Stoga problemi koje inženjeri najčešće rješavaju u obalnoj hidrotehnici, obuhvaćaju utjecaj prirode (vjetar, more) i čovjeka (mehanizacija, brodovi) na stabilnost i funkcioniranje obale, bilo prirodne ili umjetne.

U ovom radu će se obrađivati samo hidraulička funkcionalnost i hidraulička stabilnost obalne građevine, što podrazumjeva utjecaj valova na funkcioniranje i stabilnost obalne konstrukcije. U okviru hidrauličke stabilnosti promatrati će se samo opterećenje od djelovanja valova.

Osnovni tipovi obalnih građevina su tip vertikalni zid, tip nasip i obala na pilotima. Ovi tipovi se mogu primjenjivati i kombinirajući elemente pojedinih osnovnih tipova. Jedna posebna varijanta obale tipa vertikalni zid je perforirani vetiklani zid, a posebna varijanta obalne građevine tipa nasip je uronjeni valolom. Perforirani vertikalni zid je obalna građevina kojom utječemo na veličinu reflektiranih valova, a samim time na veličinu valova ispred obale i na preljevanje konstrukcije. Valolomom uzrokujemo lom valova ispred obale i samim time smanjujemo valnu energiju koja nailazi na obalnu građevinu, u ovom slučaju perforirani valobran. Kombinacijom ove dvije građevine može se postići smanjenje valnih visina između valoloma i perforiranog valobrana, a samim time manja erozija nožice temeljnog nasipa perforiranog valobrana i niža kruna perforiranog valobrana što ima ekonomski mjerljive efekte u odnosu na neke druge obalne građevine.

S obzirom da ne postoje objavljeni matematički modeli ili ispitivanja interakcije uronjenog valoloma i perforiranog valobrana, u ovom radu će se izvršiti ispitivanje interakcije ovakve dvije konstrukcije na fizikalnom modelu, a potom i formiranje matematičkog modela za proračun hidrauličke funkcionalnosti i hidrauličkog opterećenja.

Metodologija formiranja matematičkih modela za funkcionalnost i opterećenje sastojati će se od slijedećih koraka:

1. Odabir matematičkih modela koji opisuju ponašanje perforiranog valobrana i valoloma zasebno, (izvan interakcije).

2 Izrada fizikalnog modela perforiranog valobrana i valoloma zasebno, koji će služiti za kalibraciju gore odabranih matematičkih modela,

3. Formiranje novih matematičkih modela za proučavanje interakcije na osnovu kalibriranih matematičkih modela iz gornje točke,

4. Izrada fizikalnog modela interakcije perforiranog valobrana i valoloma, koji će služiti za verifikaciju novoformiranih matematičkih modela za hidrauličku funkcionalnost i hidrauličko opterećenje.

Novoformirani matematički modeli su alati kojima će biti moguće vršiti proračune optimizacije obalnih građevina u inženjerskoj praksi.

# 1 Perforirana vertikalna konstrukcija

Valobran je opći pojam za sve pomorske konstrukcije kojima se branimo od valova. U kategoriju valobrana spadaju kej, lukobran i kosa obala. Perforirani valobran je kej, lukobran ili kosa obala koja u sebi ima ugrađen nekakav tip perforirane konstrukcije.

### 1.1 Osnovne definicije i pojmovi

Perforirane konstrukcije mogu biti vertikalne, horizontalne ili pod nekim kutem. U ovom radu će se obrađivati samo vertikalne, pa će se pod pojmom perforirana konstrukcija, odsada podrazumjevati vertikalna.

Bez obzira na njihovu složenost i povećanu cijenu u odnosu na klasične ravne vertikalne konstrukcije, perforirani tipovi su sve popularniji kao unutrašnje lučke antireflektivne konstrukcije ili kao lukobrani tipa perforirani keson. Prednosti perforirane vertikalne konstrukcije su u tome što smanjuje refleksiju, preljevanje, eroziju nožice temeljnog nasipa i sile na konstrukciju. Prednost kao antireflektivne vertikalne konstrukcije imaju i u tome što ne zauzimaju puno prostora u odnosu na klasične antireflektivne konstrukcije tipa nasip.

Perforirane konstrukcije kao konstruktivni i funkcionalni djelovi mogu biti ugrađene u različite lučke građevine koje nemaju primarnu ulogu obrane od valova kao što su: molo ili gat.

Najjednostavnija perforirana konstrukcija je samo jedan perforirani zid (Slika 1a). Za smanjenje transmisije u štićeno područje mogu se predvidjeti dva (Slika 1b) ili više perforiranih zidova na određenom međusobnom razmaku.



Slika 1 Prikaz perforirane konstrukcije sa jednim i dva perforirana zida.

Posljednji zid može biti bez perforacija pa se u potpunosti sprečava transmisija, ali se povećava refleksija. Takova konstrukcija je najčešće primjenjivana i biti će predmet ovog rada. Primjer perforiranog valobrana sa jednim perforiranim zidom na kamenom nasipu je na slici (Slika 2). Pojam perforirana konstrukcija podrazumjeva perforirane zidove, stražnji nepropusni zid, gornja ploča, poprečni ukrudbeni zidovi ili grede i donja ploča. Svi ti dijelovi čine cjelinu koju zovemo perforirana konstrukcija i koja se ugrađuje kao sastavni dio u valobran ili neku drugu lučku građevinu (Slika 3).



Slika 2 Primjer perforiranog valobrana (lukobrana) sa jednim perforiranim zidom na kamenom nasipu bez gornje ploče.



Slika 3 Segment lukobrana na temeljnom nasipu s prikazom osnovnih djelova perforirane konstrukcije ugrađene u lukobran, bez gornje ploče.

Jedan perforirani zid i jedan stražnji nepropusni zid čine komoru perforirane konstrukcije. Ukoliko ima više perforiranih zidova, tada se svaki prostor između dva zida zove komora. Dodavanjem perforiranih zidova povećava se broj komora perforirane konstrukcije. U ovom radu će se obrađivati samo konstrukcije sa jednom komorom. Uobičajene širine komora su 1/10 do ¼ valne duljine L.

Disipacija energije se odvija u komori perforirane konstrukcije i u otvorima na zidovima kroz mehanizam turbulencije . Jednostavno rečeno, što je veća razlika

između razina vode s jedne i druge strane perforiranog zida, to je veća disipacija energije. Ta razlika je u funkciji valne duljine i širine komore.

#### 1.2 Podjela perforiranih konstrukcija

- 1. Prema odnosu perforiranog i neperforiranog dijela prednjeg zida
  - Potpuno perforirani
  - Djelomično perforirani

Potpuno perforirana konstrukcija ima bolja hidraulička svojstva (koeficijent refleksije, preljevanje) od djelomično perforirane gdje dolazi do potpune refleksije od neperforiranog dijela zida. Potreba za djelomično perforiranim konstrukcijama se javlja da bi se povećala težina kesona i time njegova stabilnost od prevrtanja ili klizanja.



Slika 4 a) Primjer potpuno perforine konstrukcije, b) Primjer djelomično perforirane konstrukcije.

- 2. Prema obliku perforacija
  - Uzdužni vertikalni otvori
  - Uzdužni horizontalni otvori
  - Kružni otvori
  - Pravokutni otvori
  - Razni drugi oblici otvora
- 3. Prema uporabljivosti krune
  - Sa gornjom pločom
  - Bez gornje ploče

Gornja ploča povećava koeficijente refleksije ukoliko je u dohvatu vala reflektiranog od stražnjeg zida. Naime, udaranjem grebena vala u gornju ploču, zaustavlja se tečenje kroz peforirani zid i disipacija energije. Do zaustavljanja tečenja kroz perforirani zid dolazi jer se komora u potpunosti ispuni vodom. Ovo udaranje grebena se općenito odražava većim valnim visinama ispred konstrukcije i pojavom preljevanja, [47].

- 4. Prema broju disipacijskih komora
  - Sa jednom disipacijskom komorom
  - Sa više disipacijskih komora

Većim brojem disipacijskih komora se smanjuju koeficijenti refleksije, posebice u području kratkih valova, za koje vrijedi odnos širine komore B i valne duljine L, B/L>0,25, [10].

- 5. Prema specifičnim oblikovnim karakteristikama
  - Sa zidom na kruni lukobrana
  - Sa hidrauličkim oblikovanjem konstrukcije
  - Sa kamenom ispunom komore
  - Sa poprečnim zidovima unutar komore

Prema svemu navedenom može se zaključiti da se različitim konstruktivnim kombinacijama može dobiti veliki broj tipova konstrukcija sa različitim hidrauličkim svojstvima. Složenost disipacijskog mehanizma i njegova ovisnost o konstruktivnim detaljima perforirane konstrukcije čine ovakve konstrukcije izuzetno teškima za projektiranje i zahtijeva primjenu fizikalnih modela i složenog matematičkog aparata.

# 1.3 Parametri koji utječu na hidrauličku funkcionalnost (refleksijske karakteristike) i hidrauličko opterećenje

Pravilni valovi

Pod refleksijske karakteristike podrazumjevamo koeficijent refleksije,  $K_R$ , od perforiranog zida koji se za pravilne valove definira kao:

$$K_R = \frac{H_R}{H_i} \tag{1}$$

gdje su:

H<sub>i</sub> visina dolaznog vala [m],H<sub>R</sub> visina reflektiranog vala [m],

Nepravilni valovi

Koeficijent refleksije kod nepravilnih valova se može prezentirati na više načina. Najprirodniji način je kao funkcija koeficijenta refleksije  $K_R(f)$ 

$$K_R(f) = \frac{S_{\eta r}(f)}{S_{\eta i}(f)}$$
(2)

gdje su:

$$S_{\eta r}(f)$$
 funkcija spektralne gustoće reflektiranih valova [m<sup>2</sup>/s]

 $S_{\eta i}(f)$  funkcija spektralne gustoće dolaznih valova [m<sup>2</sup>/s]

Potom je moguće iz funkcije spektralne gustoće koeficijenta refleksije, K<sub>R</sub>(f), dobiti tzv. ponderirani srednji koeficijent refleksije  $\overline{K_R}^{pond}$ , kao srednjak diskretnih koeficijenata refleksije iz spektra, K<sub>R</sub>(f), ponderiranih sa pripadnom diskretnom spektralnom energijom reflektiranog spektra:

$$\overline{K_R}^{pond} = \frac{\sum_{i=1}^n K_R(f_i) \cdot S_{\eta r}(f_i)}{\sum_{i=1}^n S_{\eta r}(f_i)}$$

Kao najjednostavniji pokazatelj refleksijskih svojstava kod nepravilnih valova se koristi koeficijent refleksije  $K_R$ , računat prema [53] kao:

$$K_R = \frac{\sqrt{\int S_{\eta r}(f)}}{\sqrt{\int S_{\eta i}(f)}} = \frac{H_{SR}}{H_{Si}}$$
(3)

gdje su:

 $\begin{array}{ll} H_{Si} & \mbox{visina dolaznog značajnog vala [m]}, \\ H_{SR} & \mbox{visina reflektiranog značajnog vala [m]}, \end{array}$ 

O refleksijskim karakteristikama konstrukcije bitno ovise i sile na konstrukciju. Naime, što je veća redukcija valne visine pod utjecajem perforiranog zida, to će biti i manje sile na konstrukciju. Proračun opterećenja konstrukcije ovisi o koeficijentu refleksije (Jednadžbe (77) i (78)). Nadalje će u tekstu biti opisivane samo refleksijske karakteristike perforiranih konstrukcija, što indirektno podrazumjeva i utjecaj na sile na konstrukciju.

### 1.3.1 Utjecaj poroznosti i oblika perforacija na refleksijske karakteristike

Perforacije na vertikalnim zidovima mogu biti različitih oblika, kao vertikalni uzdužni otvori koji idu od nožice temeljnog nasipa do vrha ili se parcijalno prostiru samo na jednom dijelu zida, kao horizontalni uzdužni otvori, također parcijalni i potpuni, zatim, mogu biti kružni otvori ili otvori nekog drugog oblika.

Vertikalni i horizontalni otvori su omeđeni stupovima, odnosno gredama, koji opet mogu biti različitih poprečnih presjeka (pravokutni, kružni, itd.). Najčešće se koriste stupovi, odnosno grede pravokutnog poprečnog presjeka.

Bez obzira o kojem tipu otvora se radi, parametar koji karakterizira perforirani vertikalni zid je poroznost i matematički se definira kao:

$$p = \frac{a}{A} \cdot 100 \quad [\%] \tag{4}$$

gdje su:

- p poroznost [%],
- a ukupna površina otvora na zidu [m<sup>2</sup>],
- A ukupna površina zida [m<sup>2</sup>].

Uobičajene poroznosti zidova koje se pojavljuju u objavljenoj literaturi su od 20 do 35%.

Prema ispitivanjima provedenim u [18] i [19], (Allsop i ostali; 1988., 1989.) na perforiranim konstrukcijama sa dva perforirana zida (Slika 5), najniže vrijednosti koeficijenata refleksije se postižu za poroznosti p=19 i 24%. Sa slike se može uočiti usko područje u kojem se nalaze koeficijenti refleksije za poroznosti p=14-28%.



Slika 5 Koeficijent refleksije K<sub>R</sub> za dvostruki perforirani zid u funkciji parametra B/L, [18] i [19].

Tvrtka Design and Investigation", [22], je "Shimonoseki 1982. načinila eksperimentalna ispitivanja na modelu koji će biti prikazan u nastavku. Korištena je konstantna širina jedne komore, B=25 cm, a varirani su periodi monokromatskih valova. Refleksijske karakteristike su ispitivane za parcijalne vertikalne uzdužne perforacije i parcijalne horizontalne uzdužne perforacije. Radi se o lukobranu tipa keson bez berme, kojemu je dubina vode u komori (d'=15,9 cm) različita od dubine vode ispred lukobrana (d=65,9 cm). Korištene su poroznosti perforiranog zida, p=25%, p=40% i p=50%. Dolazna valna visina monokromatskog vala je bila H=5 cm. Sa slike se može uočiti da razlike izmjerenih koeficijenata refleksije, nisu velike između vertikalnih i horizontalnih perforacija. Može se zaključiti da poroznost p=50%, za vertikalne uzdužne perforacije, ne daje zadovoljavajuće koeficijente refleksije u odnosu na ostale mjerene poroznosti.



Slika 6 Koeficijenti refleksije monokromatskih valova. U funkciji parametra B/L. Usporedba za različite poroznosti i oblike perforacija, [22].

Park (1993), [11], je proveo ispitivanja u laboratoriju, varirajući tip otvora na perforiranom zidu koristeći pritom horizontalne uzdužne otvore, vertikalne uzdužne i kružne otvore. Zaključili su da oblici otvora, za istu poroznost, ne utječu bitno na koeficijent refleksije. Utjecaj oblika i veličine otvora, te debljine zida na refleksijske karakteristike je ispitivao Allsop (1994), [17]. Došao je do zaključka da je utjecaj zanemariv u odnosu na poroznost i parametar B/L.

Istraživanjem u radu [21] je otkriveno da na refleksijske karakteristike zida, uz poroznost, utječe i gustoća perforacija zida. Drugim rječima, istu poroznost možemo ostvariti sa jednom ili sa 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 stupova od kojih se vrtlozi odvajaju. Stoga, cilj je za određenu poroznost postići što veću duljinu bridova za odvajanje vrtloga s tim da se zadovolje konstruktivni zahtjevi kroz minimalne dimenzije stupova.

24

# 1.3.2 Utjecaj visine perforiranog dijela prema visini neperforiranog prednjeg vertikalnog zida

Kao što je prikazano u podjeli perforiranih konstrukcija, često se iz razloga stabilnosti koriste djelomično perforirane konstrukcije, odnosno donji dio zida nema perforacija i izvodi se obično kao puni beton ili sa kamenom ili pješčanom ispunom (Slika 4b). Takva izvedba ima svoj nedostatak, a to je povećanje koeficijenta refleksije.

Brzine ispod grebena vala (Slika 7) opadaju prema kosinushiperbolnoj funkciji. Ako smjestimo neperforirani dio, od kojeg je refleksija valne energije potpuna, dublje, tada će i ukupna refleksija biti manja, i obratno.

Analize utjecaja odnosa visina perforiranog i neperforiranog dijela na refleksijske karakteristike i sile na konstrukciju dane su u [48].





### 1.3.3 Utjecaj širine komore B i valne duljine vala L (B/L)

Parametar kojim se bitno utječe na refleksijske karakteristike je ovisnost koeficijenta refleksije o parametru B/L. Širina komore B je parametar koji projektant u toku projektiranja odabire da bi dobio najbolje hidrauličke karakteristike konstrukcije.

Ovisnost koeficijenta refleksije, K<sub>R</sub>, o parametru B/L je paraboličkog oblika, a K<sub>R</sub> postiže svoj minimum za vrijednosti B/L≈0,2, (Slika 8), [2], [11].

Perforirane konstrukcije bez obzira dali su na temeljnom nasipu ili na ravnom dnu i dali su potpuno ili djelomično perforirane pokazuju slična refleksijska svojstva u ovisnosti o parametru B/L.





Za potpuno perforiranu konstrukciju bez utjecaja gornje ploče, koja leži na ravnom horizontalnom dnu, Fugazza i Natale (1992), [38], su teorijski pokazali da se minimalna refleksija događa kod odnosa širine komore B i valne duljine monokromatskog vala L, B/L=(2n+1)/4; n=0,1,2... . Gledajući s praktične inženjerske strane, širina komore je ograničena s ekonomske strane na najmanju moguću, pa iz toga proizlazi da se minimalne teoretske vrijednosti koeficijenta refleksije javljaju pri B/L=0,25, što je vrlo blisko eksperimentalnim rezultatima prikazanim na slici: Slika 8. Kod refleksije vala od vertikalnog nepropusnog zida, (clapotis), prvi čvor stojnog vala se javlja na udaljenosti L/4 od zida. Na toj poziciji (pozicija 1, Slika 9) se javljaju najveće horizontalne brzine kroz perforacije zida i samim time se ostvaruje najveća disipacija energije kroz vrtloženje i trenje, te se pojavljuje najmanja reflektirana energija. Pozicija 1 predstavlja upravo odnos B/L=0,25. U usporedbi sa pozicijom 2, (Slika 9), kod pozicije 1 se ostvaruje protok većeg volumena vode kroz perforacije, za vrijeme jednog perioda vala, nego kod zida na poziciji 2, čime se ujedno ostvaruje i veća disipacija energije. Približavanjem pozicije perforiranog zida, od pozicije 1 prema stražnjem zidu refleksija se povećava, isto tako i udaljavanjem.

Razlika mjerene vrijednosti B/L=0.2 ([11], Slika 8), i dobivene teorijski B/L=0.25, [38], je zbog zanemarivanja otpora inercije perforiranog zida u teorijskom modelu [38]. Razlika nastaje jer perforirani zid usporava valove uslijed otpora inercije. U takovoj situaciji, nastaje razlika u fazi valova unutar i neposredno izvan komore i zbog toga dolazi do pomaka prvog čvora prema unutrašnjosti komore, te tada najveća disipacija energije nastaje na manjoj udaljenosti od L/4, nego što je to teorijski objašnjeno.



Slika 9 Shematski prikaz trajektorija tečenja ispod stojnog vala sa potpunom i djelomičnom refleksijom, te pozicija 1 perforiranog zida kojoj odgovara namanja refleksija od perforirane konstrukcije (teorijski B/L=0,25) i pozicija 2 kojoj odgovara veća refleksija.

Kod nepravilnih valova je definicija koeficijenta refleksije nešto drukčija nego kod monokromatskih valova (Poglavlje 1.3). U nastavku će biti dani primjeri izračunatih koeficijenata refleksije za nepravilne valove prema radu [2] i [11].

Rezultati ispitivanja koeficijenta refleksije su prikazani na slijedećoj slici, na kojoj je prikazana ovisnost koeficijenta  $K_R$  o parametru B/L<sub>S</sub>, gdje je L<sub>S</sub> značajna valna duljina.



Slika 10 Koeficijenti refleksije K<sub>R</sub>, prema jednadžbi (3), za nepravilne valove za djelomično perforiranu konstrukciju na temeljnom nasipu, (Slika 8), p=33%, [2], [11].

Ovisnost koeficijenta refleksije K<sub>R</sub> o parametru B/L<sub>S</sub>, za nepravilne vlalove, ima vrlo sličan obrazac ponašanja kao i K<sub>R</sub> za pravilne valove. Razlika je u tome što su minimalne vrijednosti koje se pojavljuju kod nepravilnih valova (K<sub>R</sub>≈0,4), veće u odnosu na minimalne vrijednosti koje se pojavljuju kod pravilnih valova (K<sub>R</sub>≈0,0,1). Takva razlika je razumljiva, s obzirom da se kod nepravilnih valova računa s koeficijentom refleksije osrednjenim za sve komponente valnog spektra (jednadžba (3)). S obzirom da se iz valnog spektra neke frekvencije bolje reflektiraju, sa većim koeficijentom refleksije, a neke imaju vrlo mali koeficijent refleksije, tako i ukupan srednjak ne može biti vrlo mala vrijednost, kako je slučaj sa monokromatskim valovima.

Također se može uočiti da je kod strmijih valova koeficijent refleksije manji, (Slika 10), crni markeri su niže pozicionirani od bijelih). To je zbog toga što je disipacija energije u komori veća kod strmijih valova nego kod manje strmih, što će biti posebno objašnjeno u poglavlju 1.3.7.

Vrijednosti koeficijenata refleksije u ispitivanju [11], (Slika 10), su bili ograničeni za vrijednosti  $B/L_S < 0,17$ . Trend porasta koeficijenta refleksije sa porastom parametra  $B/L_S$  je isti kao i kod monokromatskih valova. Da bi se prikazao trend promjene dan

je još jedan primjer mjerenja koeficijenta refleksije  $K_R$  (prema jednadžbi (3)), objavljen u radovima [17] i [20].

Ispitivana je potpuno perforirana konstrukcija bez temeljnog nasipa i bez gornje ploče. Na osnovu provedenih ispitivanja predložena je empirijska formula za proračun refleksijskih karakteristika perforiranih konstrukcija (Jednadžba (125)). Rezultati provedenih ispitivanja na modelu, [17] i [20], i rezultati za ispitivani model perforiranog kesona u Cardiffu, [23], su prikazani na istoj slici zbog sličnosti geometrije gore navedenog modela i kesona u Cardiffu, i zbog toga što se rezultati međusobno nadopunjuju (Slika 11).



Slika 11 Koeficijenti refleksije K<sub>R</sub>, prema jednadžbi (3), za nepravilne valove za potpuno perforiranu konstrukciju s kružnim otvorima [17], [20] i [23].

Do sada su prikazani koeficijenti refleksije za monokromatske valove računati prema jednadžbi (1) i za nepravilne valove računati po jednadžbi (3). Iz dosadašnjeg izlaganja jasno je da je koeficijent refleksije  $K_R$  ovisan o valnoj duljini. Kod spektralnog opisa valova refleksija se može prikazati prema jednadžbi (2), gdje je izražena frekvencijska ovisnost koeficijenta refleksije  $K_R(f)$ .

U radu [21] načinjena su eksperimentalna istraživanja na fizikalnom modelu perforirane obale u luci Victoria Harbour Hong Kong. Upotrebljeni su nepravilni valovi sa  $H_s=0.5m$  (+1m PD, Port Datum),  $T_p=3$ , 4 i 6s;  $H_s=0.8m$  (+1m PD),  $T_p=3.2s$  i  $H_s=1.96m(+3.2m PD)$ ,  $T_p=4.6s$ , za sve testove sa slike.



Slika 12 Ispitivana konstrukcija koja je modelski ispitivana (Mj1:20) sa nepravilnim valovima predviđena u luci Victoria Harbour Hong Kong.

Kao krajnji rezultat mjerenja su dobili koeficijent refleksije u funkciji frekvencije  $K_R(f)$  (Slika 13).

S obzirom da se u jednom testu koristilo više spektara sa različitim valnim parametrima, tako postoji određeno raspršenje rezultata. Može se generalno uočiti oscilatorna frekvencijska ovisnost koeficijenta refleksije.



Slika 13 Koeficijenti refleksije  $K_R(f)$  za nepravilne valove za potpuno perforirani vertikalni zid s vertikalnim uzdužnim otvorima i bermom [21].

### 1.3.4 Utjecaj gornje ploče konstrukcije

Ukoliko se gradi građevina sa uporabnom površinom iznad disipacijske komore, posebnu pažnju treba posvetiti poziciji gornje ploče i njenom 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 sprečavanja 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 proticanje kroz perforacije zida. Nastavlja se izdizanje fizičke površine vode izvan komore i dolazi do preljevanja. Preljevanje 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 preljevanje, čije zajedničko djelovanje određuje refleksijska svojstva konstrukcije. Funkcionalna ovisnost koeficijenta refleksije o preljevanju još nije dovoljno istražena.

Parametar koji bitno određuje refleksiju od perforirane konstrukcije sa nisko postavljenom gornjom pločom je R<sub>c</sub>/H, (Slika 14), gdje je H dolazna valna visina.



Slika 14 Shematski prikaz perforiranog keja sa nisko postavljenom pločom.

U elaboratu [49] opisana su ispitivanja na konstrukciju sa nisko postavljenom krunom. Provedeno ispitivanje vrlo je slično po dimenzijama modela sa već spomenutim ispitivanjem [11], (Slika 8) i (Slika 15 a), pa je stoga napravljena usporedba rezultata s ciljem kvalitativnog definiranja utjecaja gornje ploče (Slika 16).



Slika 15 a) Presjek modela ispitivanog u elaboratu [11], b) Presjek modela ispitivanog u elaboratu [49].

Analizirana je ovisnost koeficijenta refleksije, K<sub>R</sub>, sa parametrom B/L. Ispitivanja su načinjena za pravilne valove u valnim kanalima. U ispitivanju [11] nije dozvoljeno preljevanje (R<sub>c</sub>/H= $\infty$ ), dok je u ispitivanju [49] uslijed nisko postavljene krune (R<sub>c</sub>/H=0,2-0,7) dolazilo do preljevanja kod većih valnih visina dok je kod manjih dolazilo do udaranja grebena vala u gornju ploču konstrukcije i zid na kruni, bez preljevanja. Udaranjem u gornju ploču smanjen je mehanizam disipacije i stoga je prosječni koeficijenti refleksije veći za ispitivanje [49] ( $\overline{K_R}$  =0,45), nego za ispitivanje [11], ( $\overline{K_R}$  =0,33).



Slika 16 Usporedba rezultata iz modela [11] i modela [49], za pravilne valove.

Veliko rasipanje rezultata kod ispitivanja [49] može se objasniti složenim mehanizmom refleksije od perforirane konstrukcje gdje bitno utječe gornja ploča na povećanje refleksije, preljevanje na smanjenje refleksije i zid na kruni.

Općenito, da bi se izbjegao utjecaj gornje ploče preporučuje se primjena parametra  $R_c/H_D>1\div(1+K_R)/2$ , čime se garantira da neće biti kontakta sa gornjom pločom.  $H_D$ , je projektna valna visina za funkcionalnost. Ukolio se postavlja gornja ploča na visinu dohvata grebena vala, treba računati sa izmjenjenim refleksijskim svojstvima perforiranog valobarana.

Gornja ploča predstavlja još jedan negativan utjecaj po pitanju 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 uslijed toga stvaraju impulsi sila velikih pikova. Utjecaj gornje ploče na opterećenje obrađivan je u elaboratima [50], [51], [52].

### 1.3.5 Utjecaj temeljnog nasipa

Obično se valobrani tipa zid, pa tako i oni sa ugrađenom perforiranom konstrukcijom postavljaju na temeljni nasip, zbog lošeg temeljnog tla, radi izravnavanja podloge ili zbog prevelike dubine na mjestu trasiranja valobrana.

Dio temeljnog nasipa koji utječe na hidrauličke karakteristike perforirane konstrukcije je onaj neposredno ispred. Veličina utjecaja ovisi o slijedećim geometrijskim parametrima temeljnog nasipa:

- B<sub>b</sub> širina berme, [m],
- d<sub>b</sub> visina berme od dna, [m],
- h dubina vode, [m],



Slika 17 Prikaz geometrijskih parametara temeljnog nasipa koji utječu na hidrauličke karakteristike perforirane konstrukcije.

Obično se širina berme, B<sub>b</sub>, izvodi sa minimalnom veličinom s obzirom na uštedu materijala. Berma bi trebala biti širine dovoljne da se na nju mogu postaviti dva zrna obloge temeljnog nasipa, čija veličina ovisi o valnoj i strujnoj klimi ili struji vode iz pogonskih propelera brodova.

Nadalje će biti prikazan dijagram utjecaja temljenog nasipa na koeficijent refleksije perforirane konstrukcije (Slika 18, [42]). Utjecaj širine berme je isključen tako što je modelirana širina berme  $B_b$ =0m . Dijagram je načinjen za valove okomito usmjerene na valobran, dubinu vode d=10m, za poroznost p=30%, monokromatske valove visine H=2m, perioda T=8s.



Slika 18 Utjecaj temeljnog nasipa na koeficijent refleksije, [42].

Temeljni nasip uzrokuje refleksiju valne energije i time povećanje koeficijenta refleksije. Za više i strmije temeljne nasipe povećanje koeficijenta refleksije može biti do 13%. Za uobičajene visine i nagibe pokosa temeljnog nasipa povećanje koeficijenta refleksije uslijed utjecaja temeljnog nasipa je zanemarivo.

### 1.3.6 Utjecaj kuta nailaska valova

U realnim uvjetima valovi će na konstrukciju nailaziti pod različitim kutevima, ovisno o vjetrovnoj klimi. Hidraulički odziv perforirane konstrukcije ovisi o kutu nailaska valova. Najbolji hidraulički odziv, odnosno najmanje koeficijente, konstrukcija daje za okomiti nailazak valova na konstrukciju, odnosno sa smjerom  $\theta = 0^{\circ}$ . Povećanjem kuta nailska smanjuje se efekt disipacije energije kroz perforacije i time dolazi do povećanja koeficijenata refleksije.



Slika 19 Ovisnost koeficijenta refleksije, K<sub>R</sub>, o kutu nailaska valova  $\theta$  [°], okomiti smjer nailaska vala pripada kutu  $\theta$ =0°, [42], za strmost vala H/L= 1/120.

Na gornjoj slici je prikazan utjecaj kuta nailaska valova na perforiranu konstrukciju prema [42]. Kako je već rečeno teoretski minimum koeficijenta refleksije se javlja za B/L=0,25. Kada valovi dolaze pod kutem na konstrukciju tada je teoretski minimum za vrijednost B cos  $\theta$  /L=0,25.

Iz gornjeg dijagrama je načinjen dijagram promjene koeficijenta refleksije koji pripada određenoj vrijednosti B/L (Slika 20). Odabrane vrijednosti B/L, pripadaju području inženjerski interesantnih vrijednosti. Naime, ako pretpostavimo da je ekonomski prihvatljiva širina komore B=5m, tada valne duljine koje pripadaju vrijednostima B/L=0,15, 0,2 i 0,25 su L=33,3, 25 i 20m, a to su upravo valne duljine kojima pridajemo važnost kod primjene perforiranih konstrukcija. Za vrijednosti B/L>0,25, nema inženjerske opravdanosti s obzirom da su to valovi manje duljine od L=20m, što predstavlja valove manje valne visine.

Dijagrami (Slika 19, Slika 20) su načinjeni za situaciju bez poprečnog zida za ukrućenje konstrukcije, (Slika 3). Zid za ukrućenje izaziva refleksiju valova unutar komore i dodatno može povećati koeficijente refleksije kada valova dolaze pod kutem na konstrukciju. Opća preporuka je projektirati grede za ukrućenje ili u zidovima predvidjeti otvore.




## 1.3.7 Utjecaj strmosti valova

Valovi se razlikuju prema strmosti, parametru koji je kod pravilnih valova odnos valne visine prema valnoj duljini H/L, ili kod nepravilnih valova, odnos značajne valne visine prema vršnoj valnoj duljini H<sub>s</sub>/L<sub>p</sub>. Strmiji valovi su obično valovi živog mora, ili oni koji se pojavljuju na morskoj površimi tijekom oluja ili jačega vjetra (H/L=0,05-0,125) u području generiranja. Valovi mrtvoga mora nastaju nakon prestanka puhanja vjetra ili izlaskom izvan područja generiranja i obično su karakterizirani malim strmostima (H/L<0,05).

Na valobranima se realno mogu pojaviti valovi živog i mrtvog mora. Utjecaj strmosti valova na koeficijente refleksije je prikazana na donjoj slici.



Slika 21 Utjecaj strmosti, H/L, monokromatskih valova na koeficijent refleksije,  $K_R$ , [16].

Iz eksperimentalnih istraživanja sa monokromatskim valovima u valnom kanalu, opisanima u radu [16], načinjena je raspodjela koeficijenata refleksije u ovisnosti o parametru B/L, ali za svaku strmost valova posebno. Može se primjetiti da se strmiji valovi, npr. H/L=1/13 i 1/19, slabije reflektiraju od perforirane konstrukcije, odnosno disipacija energije u odnosu na dolaznu energiju je veća. To se može objasniti time što su kod strmijih valova, valova veće valne visine za istu valnu duljinu, brzine ispod grebena veće i time se ostvaruje veće vrtloženje iza perforacija i disipacija energije.

Kod nepravilnih valova je utjecaj strmosti vala na refleksijske karakteristike perforirane konstrukcije slabije izražen zbog toga što je strmost H<sub>S</sub>/L<sub>p</sub>, statistički parametar koji se dobiva iz vremenskog niza valova različitih strmosti.

U radu [7], načinjen je fizikalni model potpuno perforirane vertikalne konstrukcije, bez temeljnog nasipa, poroznosti p=33%.



Slika 22 Utjecaj strmosti, H<sub>s</sub>/L<sub>s</sub>, nepravilnih valova na koeficijent refleksije, K<sub>R</sub>, [7].

Ovdje je utjecaj strmosti prikazan na drugačiji način nego na prethodnoj slici (Slika 21), s obzirom da je korišten drugačiji tip valnih parametara koji nisu bili kategorizirani po određenim vrijednostima strmosti. Strmosti su definrane po kategorijama. Za određenu valnu duljinu L<sub>s</sub> (fiksni parametar B/L<sub>s</sub>), korištene su tri različite valne visine kojima je određena vrijednost strmosti. Tako je vrijednosti značajne valne visine, H<sub>s</sub>=9cm, pripadao raspon strmosti H<sub>s</sub>/L<sub>p</sub>=1/27 – 1/40, vrijednosti H<sub>s</sub>=6cm, raspon strmosti H<sub>s</sub>/L<sub>p</sub>=1/40 – 1/62 i vrijednosti H<sub>s</sub>=3cm, raspon strmosti H<sub>s</sub>/L<sub>p</sub>=1/65 – 1/123.

## 1.3.8 Utjecaj balasta unutar komore

Za potrebe izgradnje perforiranog vertikalnog lukobrana u luci Dieppe (Seine-Maritime, Francuska), na Sveučilištu u Caenu je izrađen fizikalni model mjerila 1:25 [12]. Model je izrađen sa poroznom bermom i balastom (Slika 23 A), i sa ravnim dnom bez balasta (Slika 23 B), što odgovara izvedenom stanju. Nadalje su navedene osnovne karakteristike modela:



Slika 23 Presjek dva tipa modela kesona u luci Dieppe Seine-Maritime, Francuska, M:1:25; A-modelirani presjek identičan izvedenom lukobranu, B-ekperimentalni presjek, također ispitivan. Poroznost p=28%, kružne perforacije, [12].

U nastavku je dan dijagram ovisnosti koeficijenta refleksije  $K_R$  u funkciji B/L za presjeke sa balastom (Slika 23 A) i bez balasta (Slika 23 B), za monokromatske valove.



Slika 24 Koeficijent refleksije K<sub>R</sub> u funkciji odnosa B/L za presjek sa balastom, (Slika 23 A), i presjek bez balasta, (Slika 23 B), [12], monokromatski valovi.

Sa gornje slike se uočava da su vrijednosti koeficijenta K<sub>R</sub> manje za slučaj presjeka bez balasta (Slika 23 B), u odnosu na presjek sa balastom (Slika 23 A). Razlog tomu je što se u volumenu komore koji zauzima balast, događa vrtloženje i disipira se dio energije, koji se ne disipira u slučaju presjeka sa balastom.

Primjer vrtloženja unutar komore perforirane konstrukcije dan je kao srednjak brzina za jedan valni period (. Sa ove slike se može uočiti generalna slika cirkulacije unutar komore. Što je komora veća (dublja), time se ostvaruje veći prostor za vrtloženje i time disipaciju energije.



Slika 25 Primjer osrednjenog polja brzine za jedan valni period, unutar komore vertikalne perforirane konstrukcije, [12].

Prema gore navednom eksperimentu, zaključeno je da je razlika između dolazne i reflektirane valne energije, energija disipirana u komori perforirane konstrukcije. Raznim konstruktivnim zahvatima unutar komore, moguće je povećati disipaciju energije i s time povećati učinkovitost komore. Znanstvenici sa Sveučilišta u Caneu su vršili optimalizaciju jednokomorne konstrukcije i dobili smanjenje koeficijenta refleksije u odnosu na klasičan tip jedne komore vertikalne perforirane konstrukcije.

# 1.3.9 Utjecaj geometrijskog oblikovanja konstrukcije

Prema [21], u uglovima na spoju gornje ploče i stražnjeg zida dolazi do pojave komprimiranja zraka i pojave impulsih sila. Jedan od načina da se umanje takove pojave je zaobljavanje uglova čime se ostvaruje pvratni tok vode i ublažavanja koncentracije sile. Također se prepuručuje i primjena otvora kojima se može smanjiti sila i na gornju ploču od 25 do 50 %.

# 1.4 Ispitivanja "in-situ"

Ispitivanja na terenu su provedena u okviru Europskog istraživačkog projekta MAST III, PROVERBS-Project, "Probabilistic design tools for Vertical Breakwaters", 1999, http://ec.europa.eu/research/mast-I.html.

# 1.4.1 Lukobran u luci Dieppe

Izgradnja perforiranog vertikalnog lukobrana "Jarlanovog" tip u luci Dieppe (Seine-Maritime, Francuska), omogućio je da se provedu opsežna laboratorijska i terenska ispitivanja, te načini njihova usporedba [12].

Lukobran je izgrađen 1992 od dvostrukih "Jarlanovih" kesona u ukupnoj duljini 225m. Primjer jednog kesona ploženog na temeljni nasip je prikazan na donjoj slici.



Slika 26 Lukobran sa perforiranom konstrukcijom u luci Dieppe, Seine-Maritime, Francuska.

Na donjoj slici je prikazan poprečni presjek lukobrana. Radi se o dvije komore, jedna sa lučke strane i druga sa pučinske strane. Komora sa pučinske strane nema gornju ploču radi izbejegavanja povečanih sila na konstrukciju i povećanja refleksije od perforirane konstrukcije. S lučke strane su valovi manji pa je kruna uporabna, ali su ostavljeni ventilacijski otvori da bi se smanjile sile uslijed komprimiranja zraka uz gornju ploču komore. Dno kesona je ispunjeno pijeskom radi povećanja težine konstrukcije, a time i stabilnosti. Cijela konstrukcija je temeljena na temeljnom nasipu.



Slika 27 Poprečni presjek lukobrana u luci Dieppe.



Slika 28 Segment perforiranog zida, od kojeg je građen lukobran u luci Dieppe.

Lukobran je građen od kesona duljine 25m i širine 17m sa, dvije disipacijske komore. Perforirani zid (p=28%) je bio načinjen od armiranog betona debljine 0,9m sa kružnim otvorima promjera 0,9m. Širina vanjske komore je B=13,5m, a unutrašnje B=10m. U okviru mjerenja provedenih na sagrađenom lukobranu mjereni su tlakovi na konstrukciju u mjernim točkama na prednjem zidu, stražnjem zidu i na temeljnoj ploči (Slika 27).

### 1.4.2 Lukobran u luci Torres

Porto Torres je luka na sjeveru Sardinije gdje je 1990 sagrađen perforirani lukobran sa donje slike.

Lukobran se sastoji od tri komore različite dubine u odnosu na MR, sve sa pravokutnim otvorima. Perforirane komore su okrenute prema pučini. Na kruni je sagrađen zid sa kotom +8m iznad MR-a.

U okviru mjerenja provedenih na sagrađenom lukobranu mjereni su tlakovi na konstrukciju sa 53 tlačna senzora.



Slika 29 Presjek lukobrana u luci Torres na Sardiniji.



Slika 30 Gradnja perforiranog lukobrana u luci Torres, Sardinija.

## 1.4.3 Utjecaj modela

Rezultati mjerenja na modelu, [12], (M1:25; Poglavlje 1.1.2) i prototipu su komparacijski dijagrami tlakova mjerenih na modelu i prototipu. Komparacija, (Slika 31), je rađena za tlakomjer w5, (Slika 27). Vrijednosti značajnih valnih visina i tlakova su dani za mjerilo prirode. Tlak  $P_{1/10}$  podrazumjeva srednju vrijednost desetine najviših zabilježenih tlakova u sekvenci koja pripada određenoj H<sub>s</sub>.



Slika 31 Ovisnost tlaka P1/10 i Hs na modelu i prototipu na stražnjem nepropusnom zidu kesona na mjernom instrumentu w5 (Slika 27), odnosno P03 (Figure 11).

Može se zaključiti da je utjecaj modela na mjerenje sila u laboratoriju zanemarivo mali u odnosu na izmejrene sile u prirodi.

# 1.5 Matematički proračunski modeli za hidrauličku funkcionalnost i hidrauličko opterećenje

### 1.5.1 Analitički matematički modeli

#### 1.5.1.1 Hidraulička funkcionalnost

Strujanje kroz perforirani zid i unutar komore perforiranog zida je izuzetno složeno polje strujanja. Tako je i matematički prikaz i analiza u tom području izazovan zadatak. Stoga su se koristili i još uvjek se koriste pojednostavljeni analitički i numerički modeli koji su u inženjerskom smislu pogodni za modeliranje perforiranih valobrana.

Prvotni opisi hidrauličkih karakteristika perforiranih valobrana su bili heuristički modeli, Marks i Jarlan (1968),[29], Terret i ostali (1968),[30]. Prvi pokušaj objašnjavanja hidrauličkog fenomena je predstavljen u radu Richey i Sollit (1970), [31]. Oni su uspjeli objasniti rezonantno ponašanje perforirane konstrukcije kao interakciju mlazova vode kroz perforacije i inercije vode koja se nalazila u komori. Sawaragi i lwata (1973, 1978 i 1979), [32, 33, 34], su objasnili valove na perforiranom zidu kao superpoziciju beskonačnog broja progresivnih valova.

Kondo (1979), [14], prikazuje teoretski model, baziran na teoriji dugih valova, da bi odredio koeficijet transmisije i refleksije za peforirani valobran sa dva paralelna perforirana zida bez stražnjeg zida. Razmatrani model postavlja kao superpoziciju linearnih dolaznih i reflektiranih valova.

Natale je 1983, [37], koristeći metodu "standard dividing method", rješio problem rubnih uvjeta izveden iz linearnog opisa valova izvan i u komori perforirane konstrukcije.

Na osnovu rada [37] su Fugazza i Natale, 1992, [38], izveli analitički model za pravilne valove za proračun perforiranih konstrukcija na ravnom dnu koji će u nastavku biti predstavljen.

Suh i Park (1995), [42], su načinili matematički model za popuno perforirani vertikalni zid na kamenom nasipu za pravilne valove. Dokazali da se utjecaj temeljnog nasipa može zanemariti.

Suh i ostali (2001), [7], razvijaju matematički model iz rada [37] tako da može računati sa nepravilnim valovima.

Suh i ostali (2006), [2], nadograđuju matematički model iz rada [42], tako da računa za nepravilne valove i za parcijalno perforiranu konstrukciju.

#### 1.5.1.1.1 Pravilni valovi

#### Model Fugazza i Natale, 1992

Pretpostavimo perforiranu konstrukciju prikazanu na slici 32. Na slici su definirane oznake kako slijedi:

- d dubina vode ispred i unutar perforirane konstrukcije [m],
- B širina komore perforirane konstrukcije [m],
- L valna duljina [m],
- H valna visina [m],
- k valni broj k= $2\pi/L$  [1/m],

Predpostavimo monokromatske valove, grebenove paralelne liniji obale, male amplitude valova, smjer pružanja valova okomito na obalnu liniju. Polje tečenja se dijeli u dva područja: 1. područje izvan komore  $\omega_0$ , i 2. područje unutar komore  $\omega_1$ .





U svakom od područja brzinski valni potencijal je definiran funkcijama:

$F_0(z) = \cosh[k_0(z + d_0)]$	(5)
$F_1(z) = \cosh[k_1(z+d_1)]$	(6)
$F_{0n}(z) = \cos[M_{0n}(z+d_0)],$	(7)
$F_{1n}(z) = \cos[M_{1n}(z+d_1)]$	(8)

gdje su:

 $k_{0,} k_{1}$  valni broj incidentnog i reflektiranog vala u području izvan komore, odnosno u komori [1/m],

 $M_{0n,}M_{1n}$  valni broj iščezavajućeg vala u području izvan komore, odnosno u komori [1/m],

 $d_{0,} d_{1}$  dubina vode izvan komore, odnosno u komori [m].

lščezavajući valovi nastaju prolaskom struje vode kroz perforacije zida i šire se koncentrično od perforacija zida. Odlikuju se malom energijom, odnosno malom valnom visinom i duljinom, stoga iščezavaju u slijed sila kapilarnosti. U matematičkim modelima se obično zanemaruju.

Ukupni brzinski potencijal je definiran kao superpozicija brzinskih potencijala incidentnih i reflektiranih progresivnih valova i iščezavajućih valova za područje izvan komore:

$$\Phi_{0}(x,z,t) = \operatorname{Re}\left\{F_{0}(z)\left[(a_{0}+ib_{0})e^{i(k_{0}x-\omega t)}+(c_{0}+id_{0})e^{i(k_{0}x+\omega t)}\right]\right\}$$
  
+ 
$$\operatorname{Re}\left\{\sum_{n=1}^{\infty}F_{0n}(z)\left[(a_{0n}+ib_{0n})e^{-M_{on}x}+(c_{0n}+id_{0n})e^{-M_{on}x}\right]e^{i\omega t}\right\}$$
 (n=1,2....) (9)

U gornjoj jednadžbi su:

 $a_0 = Hg / [2\omega \cosh(k_0 h)]$  i  $b_0 = 0$ , T valni period [s],  $\Omega = 2\pi / T$  kružna frekvencija

Za područje unutar komore, superpozicija brzinskih potencijala incidentnih i reflektiranih progresivnih valova i iščezavajućih valova je definirana funkcijom:

$$\Phi_{1}(x, z, t) = \operatorname{Re}\left\{F_{1}(z)\left[(a_{1} + ib_{1})e^{i(k_{1}x - \omega t)} + (c_{1} + id_{1})e^{i(k_{1}x + \omega t)}\right]\right\}$$
  
+ 
$$\operatorname{Re}\left\{\sum_{n=1}^{\infty}F_{1n}(z)\left[(a_{1n} + ib_{1n})e^{-M_{1n}x} + (c_{1n} + id_{1n})e^{-M_{1n}x}\right]e^{i\omega t}\right\}$$
 (n=1,2....) (10)

Disperzijske jednadžbe za gornje dvije funkcije valnog potencijala kojima se određuju  $k_{0,} k_{1}, M_{0n}$  i  $M_{1n}$ , su definirane kao:

$$\omega^{2} = gk_{0} \tanh(k_{0}d_{0}) = gM_{0n} \tan(M_{0n}d_{0})$$
 (11)

$$\omega^{2} = gk_{1} \tanh(k_{1}d_{1}) = gM_{1n} \tan(M_{1n}d_{1})$$
(12)

Daljnji uzvod će se temeljiti na pretpostavci da je dubina u komori jednaka dubini ispred perforiranog zida. Na taj način se zanemaruje temeljni nasip na kojem je temeljen perforirani valobran.

Uz gore uvedenu pretpostavku mogu se donijeti slijedeći zaključci:

 $d_0=d_1=d,$   $k_0=k_1=k,$   $M_{0n}=M_{1n=}M_n,$   $F_0(z)=F_1(z)=F(z),$  $F_{0n}(z)=F_{1n}(z)=F_n(z),$ 

Jednadžbe brzinskog valnog potencijala  $\phi_0$  i  $\phi_1$  zadovoljavaju dinamički rubni uvjet i kinematičke rubne uvjete, te LaPlace-ovu jednadžbu. Da bi se modelirao utjecaj

perforiranog zida na refleksiju valova od vertikalnog nepropusnog zida (stražnji zid komore), potrebno je uvrstiti potencijale  $\phi_0$  i  $\phi_1$  u slijedeće rubne uvjete:

Rubni uvjet 1  

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial x} = \frac{\partial \phi_1}{\partial x}, \quad \text{za x=0}$$
(13)

Za potencijalno strujanje vrijedi  $\frac{\partial \phi_0}{\partial x} = u_0$  i  $\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = u_1$ , gdje su  $u_0$  i  $u_1$  brzine izvan i u komori. Gornjim rubnim uvjetom se postavlja jednadžba kontinuiteta za perforirani zid.

Rubni uvjet 2

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial t} - \frac{\partial \phi_0}{\partial t} - \beta \frac{\partial \phi_0}{\partial x} - l \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial x \partial t} = 0, \text{ za x=0}$$
(14)

Gornjom jednadžbom je definirana dinamička jednadžba kojom se definiraju lokalni gubitci energije ( $\beta \frac{\partial \phi_0}{\partial x}$ ) prilikom proticanja kroz otvore perforiranog zida i utjecaj člana inercije ( $l \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial x \partial t}$ ) uslijed lokalnog ubrzanja na duljini "I". Za  $\frac{\partial \phi_0}{\partial t} = \frac{p_0}{\rho}$  i  $\frac{\partial \phi_1}{\partial t} = \frac{p_1}{\rho}$ , gornja jednadžba se može pisati i u slijedećem obliku:

$$\frac{p_0}{\rho} - \frac{p_1}{\rho} - \frac{\alpha}{2}U|U| - \int_I \frac{\partial U}{\partial t} = 0$$
(15)

gdje su:

p<sub>0</sub> tlak u području ispred perforiranog zida, [N/m<sup>2</sup>],

 $p_1$  tlak unutar komore, [N/m<sup>2</sup>],

- $\alpha$  koeficijent lokalnog gubitka energije,
- U srednja brzina vode u otvorima perforiranog zida, u<sub>0</sub>=pU, [m/s],
- p poroznost perforiranog zida,
- l duljina integracije na kojoj se javlja lokalno ubrzanje unutar otvora.

Prva dva člana predstavljaju potencijalnu energiju prije i poslije perforiranog zida, treći član predstavlja lokalni gubitak energije i zadnji član predstavlja utjecaj lokalnog ubrzanja. Jednostavno rečeno, razlika potencijalne energije u presjeku prije i poslije perforiranog zida je jednaka gubicima uslijed lokalnog gubitka energije i inercijalnog člana lokalnog ubrzanja, koji regulira nestacionarnost u jednadžbi.

$$\alpha = \left(\frac{1}{pC_c} - 1\right)^2 \tag{16}$$

gdje su:

p poroznost perforiranog zida,

C<sub>c</sub> koeficijent kontrakcije izlaznog mlaza iz perforacije zida,

Prema [35] preporučuje se,  $C_C=0,4-0,8$ , a prema [40], predlaže se jednadžba:

$$C_c = 0.6 + 0.4 p^2 \tag{17}$$

Član  $(\beta \frac{\partial \phi_0}{\partial x})$  u dinamičkoj jednadžbi je linearizacija člana lokalnog gubitka  $\frac{\alpha}{2}U|U|$ . Jednadžba za koeficijent disipacije  $\beta$  se dobije pomoću Lorentz-ove transformacije, [36], gdje se izjednačuje količina disipirane energije računata linearnim članom i nelinearnim članom. Izraz za  $\beta$  će biti definiran naknadno u tekstu.

Rubni uvjet 3  

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = 0$$
, za x=B (18)

Gornji uvjet predstavlja nepropusnost stražnjeg zida komore, odnosno definira da komponenta brzine u smjeru okomito na zid isčezava.

Nakon što se valni potencijali  $\phi_0$  i  $\phi_1$  uvrste u gornje rubne uvjete, rješenje se dobije na slijedeći način: Dobivene jednadžbe se pomnože sa funkcijama F<sub>0</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>0n</sub>, F<sub>1n</sub>, koje predstavljaju vlastite funkcije valnih potencijala  $\phi_0$  i  $\phi_1$ . Potom se jednadžbe integriraju po dubini, na intervalu (-d, 0). Zbog ortogonalnosti vlastitih funkcija dobije se sustav linearnih jednadžbi sa slijedećim nepoznanicama: c<sub>0</sub>, d<sub>0</sub>, a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>, c<sub>0n</sub>, d<sub>0n</sub>, a<sub>1n</sub>, b<sub>1n</sub>, c<sub>1n</sub>, d<sub>1n</sub> (n=1,2....).

$$d_0 - b_1 - d_1 = 0 \tag{19}$$

$$c_0 - a_1 - c_1 = a_0 \tag{20}$$

$$Pc_0 - (R+1)d_0 + b_1 - d_1 = Pa_0$$
(21)

$$(R+1)c_0 - Pd_0 - a_1 - c_1 = (R-1)a_0$$
(22)

$Wa_1 + b_1 + Wc_1 + d_1 = 0$ ,	(23)
$a_1 + Wb_1 - c_1 + Wd_1 = 0$	(24)
$c_{0n} + a_{1n} - c_{1n} = 0$	(25)
$d_{0n} + b_{1n} - d_{1n} = 0$	(26)

$$R_n c_{0n} - (P_n + 1)d_{0n} + b_{1n} + d_{1n} = 0$$
<sup>(27)</sup>

$$(P_n + 1)c_{0n} + R_n d_{0n} - a_{1n} - c_{1n} = 0$$
<sup>(28)</sup>

$$a_{1n}E_n^- - c_{1n}E_n^+ = 0 ag{29}$$

$$b_{1n}E_n^+ - d_{1n}E_n^- = 0 ag{30}$$

gdje su:

$$P = lk \tag{31}$$

$$R = \beta \left(\frac{k}{\omega}\right) \tag{32}$$

 $W = \tan(kB) \tag{33}$ 

$$R_n = \beta \left(\frac{M_n}{\omega}\right),\tag{34}$$

$$P_n = lM_n \tag{35}$$

$$E_n^{\pm} = \exp(\pm M_n B) \tag{36}$$

Jednadžbe (19) - (30) su nezavisne. Sistem jednadžbi od (25) - (30) je homogen i ima maksimalni rang pripadajuće matrice, tako da postoji samo trivijalno rješenje:

$$c_{0n} = d_{0n} = a_{1n} = b_{1n} = c_{1n} = d_{1n} = 0,$$
 (n=1,2....). (37)

Iz gornjeg se može zaključiti da su svi koeficijenti koji se odnose na iščezavajuće valove jednaki 0, pa stoga oni isčezavaju.

Jednadžbe (19) - (24) daju rješenja:

$$c_0 = a_0 \frac{G^2 - W^2 (1 - R^2)}{G^2 + W^2 (1 + R)^2}$$
(38)

$$d_0 = -a_0 \frac{2GW}{G^2 + W^2 (1+R)^2}$$
(39)

gdje je:

$$G = 1 - PW \tag{40}$$

S obzirom da je  $b_0=0$ , koeficijent refleksije se može definirati kao odnos amplitude reflektiranog vala i amplitude dolaznog vala:

$$K_{R} = \frac{\sqrt{c_{0}^{2} + d_{0}^{2}}}{a_{0}}$$
(41)

Nakon uvrštavanja se dobije jednadžba za koeficijent refleksije od perforiranog zida:

$$K_{R} = \frac{\left[ \left( G^{2} + W^{2} \right)^{2} + W^{2} R^{2} \left( W^{2} R^{2} + 2G^{2} - 2W^{2} \right) \right]^{0.5}}{G^{2} + W^{2} (1+R)^{2}}$$
(42)

Reflektirana valna visina se određuje prema:

$$H_r = K_R H_i \tag{43}$$

U jednadžbi (14) je definirana duljina mlaza "l" koji izlazi iz otvora perforiranog zida. Ta vrijednost određuje veličinu inercijalnog člana i njegov doprinos disipaciji energije. Prema [39], preporuča se za proračun duljine mlaza "l" slijedeći izraz:

$$l = 2C; \quad C = \frac{A2}{2} \left( \frac{A1}{a1} - 1 \right) + \frac{2A1}{\pi} \left[ 1 - \log\left(\frac{4a1}{A1}\right) + \frac{1}{3}\frac{a1}{A1} + \frac{281}{180} \left(\frac{a1}{A1}\right)^4 \right]$$
(44)

gdje su dimenzije prema slici 32:

A1 karakteristična dimenzija stupa koja pripada jednom otvoru perforiranog zida [m],

A2 debljina stupa perforiranog zida [m],

a1 karakteristična dimenzija otvora koja pripada jednom stupu perforiranog zida [m].

Linearizirani član  $\beta$ , koji se pojavljuje u jednadžbi (14) se računa prema [36]:

$$\beta = \frac{8\alpha}{9\pi} H\omega \frac{W}{\sqrt{W^2 (R+1)^2 + G^2}} \frac{5 + \cosh(2kd)}{2kd + \sinh(2kd)}$$
(45)

55

### 1.5.1.1.2 Nepravilni valovi

#### Model Suh i Park, 2001, [7]

U nastavku će biti prikazan analitički model koji su razvili Suh i Park 2001, [7], a na osnovu formulacije koju je razvio Park, 2000, [41], za proračun raspršenja nepravilnih valova iza vertikalnih valjaka.

Nadonjoj slici je prikazana skica sa mjerodavnim dimenzijama za proračun refleksije nepravilnih valova od peeforiranog zida.





Razmatramo nepravilne valove koji dolaze u x smjeru i grebenovi su im paralelni sa linijom obale. Bazirano na teoriji malih amplituda, izdizanje fizičke površine mora se može opisati preko kompleksnog zapisa kao:

$$\eta_i(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{H_n}{2} e^{i(k_n x - \omega_n t + \varepsilon_n)}$$
(46)

gdje su:

- $\eta_i$  izdizanje fizičke površine mora dolaznog vala, [m]
- H<sub>n</sub> valna visina pojedine valne komponente, [m]
- k<sub>n</sub> valni broj pojedine valne komponente, [1/m]
- $\omega_n$  kružna frekvencija pojedine valne komponente, [1/s]
- ε<sub>n</sub> fazni pomak pojedine valne komponente, [1]

Funkcionalna ovisnost valnog broja i kružne frekvencije je dana:

$$\omega_n^2 = gk_n \tanh(k_n d) \tag{47}$$

Brzinski potencijal je definiran kao superpozicija incidentnih i reflektiranih progresivnih valova i iščezavajućih valova. Kako smo vidjeli za pravilne valove, iščezavajući valovi imaju sve koeficijente jednake nuli (jednadžba (37)). Zbog toga se isčezavajući valovi ne uzimaju u obzir u brzinskom potencijalu. Nadalje su dani brzinski potencijali za područje prije perforiranog zida:

$$\Phi_0(x, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{gH_n}{2\omega_n} \frac{\cosh[k_{0n}(z+d_0)]}{\cosh k_{0n}} \phi_{0n}(x) e^{i(-\omega_n t + \varepsilon_n)}$$
(48)

i jednadžba za brzinski potencijal u komori perforiranog valobrana:

$$\Phi_{1}(x,z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{gH_{n}}{2\omega_{n}} \frac{\cosh[k_{1n}(z+d_{1})]}{\cosh k_{1n}} \phi_{1n}(x) e^{i(-\omega_{n}t+\varepsilon_{n})}$$
(49)

Daljnji uzvod će se temeljiti na pretpostavci da je dubina u komori jednaka dubini ispred perforiranog zida. Uz uvedenu pretpostavku mogu se donijeti slijedeći zaključci:

d<sub>0</sub>=d<sub>1</sub>=d, k<sub>0</sub>=k<sub>1</sub>=k.

U jednadžbama (48) i (49) funkcija  $\phi_{1n}(x)$  i  $\phi_{0n}(x)$  predstavljaju prostornu horizontalnu promjenu n-te komponente valnog potencijala:

$$\phi_{0n}(x) = e^{ik_n x} + C_{rn} e^{-ik_n x} \qquad za \ x < 0 \tag{50}$$

$$\phi_{1n}(x) = C_{fn} e^{ik_n x} + C_{bn} e^{-ik_n x} \qquad za \ 0 < x < B \tag{51}$$

U gornjim jednadžbama koeficijent  $C_{rn}$  predstavlja kompleksnu vrijednost koeficijenta refleksije,  $C_{fn}$  predstavlja kompleksnu vrijednost amplitude propagirajućih valova unutar komore i  $C_{bn}$  predstavlja kompleksnu vrijednost amplitude reflektirajućih valova unutar komore.

Da bi se modelirao utjecaj perforiranog zida na refleksiju valova od vertikalnog nepropusnog zida (stražnji zid komore), jednadžbe valnog potencijala (50) i (51) moraju zadovoljavati slijedeće rubne uvjete:

Rubni uvjet 1

$$\phi_{n1} - \phi_{n0} = 2C \frac{d\phi_{n0}}{dx} + \frac{i\overline{\beta}}{\omega_n} \frac{d\phi_{n0}}{dx}$$
 za x=0 (52)

Gdje se C definira prema geometrijskim karakteristikama perforiranog zida, prema jednadžbi (44).  $\overline{\beta}$  je po dubini osrednjeni koeficijent disipacije. Dobiva se na slijedeći način:

$$\overline{\beta} = \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \frac{\int_{-d}^{0} \sigma(z)^{3} dz}{\int_{-d}^{0} \sigma(z)^{2} dz}$$
(53)

$$\sigma(z) = \sqrt{\int_{0}^{\infty} S_{u0}(\omega) \, d\omega} = \sqrt{\int_{0}^{\infty} |T(\omega)|^2 S_{\eta i}(\omega) \, d\omega}$$
(54)

$$T(\omega) = \omega \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \frac{\tan(kB)}{\sqrt{\tan^2(kB)\left(1 + \overline{\beta}\frac{k}{\omega}\right)^2 + 1 - 2Ck\tan(kB)}}$$
(55)

gdje su:

 $\sigma(z)$  standardna devijacija brzine u<sub>0</sub>(z), uz predpostavku Gaussove normalne raspodjele,

 $S_{u0}(\omega)$ spektralna gustoća brzine  $u_{0,}$ 

 $T(\omega)$  prijenosna funkcija.

Sustav jednažbi (53), (54) i (55) nije riješiv eksplicitno stoga je potrebno primjeniti iterativni prostupak.

Rubni uvjet 2

$$\frac{d\phi_{n0}}{dx} = \frac{d\phi_{n1}}{dx} \qquad \qquad \text{za x=0} \tag{56}$$

Izražava jednadžbu kontinuiteta na perforiranom zidu.

Rubni uvjet 3

$$\frac{d\phi_{n1}}{dx} = 0 \qquad \qquad \text{za x=B} \tag{57}$$

Izražava nepropusnost stražnjeg zida komore.

Koeficijenti u jednadžbama (50) i (51) se mogu zapisati u kompleksnom zapisu kao:

$$C_{m} = c_{0} + id_{0}$$

$$C_{fn} = a_{1} + ib_{1}$$

$$C_{bn} = c_{1} + id_{1}$$
(58)

Uvrštavanjem gornjih jednadžbi u jednadžbe (50) i (51) i primjenjujući rubne uvjete dobiva se sistem linearnih jednadžbi sa nepoznanicama  $c_0$ ,  $d_0$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$  i  $d_1$ . Rješavanjem sustava lineranih jednadžbi dobiju se gore definirane nepoznanice koje se potom uvrštavaju u jednadžbe (58), iz čega slijedi:

$$C_{rn} = \frac{G_n^2 - W_n^2 (1 - R_n^2)}{G_n^2 + W_n^2 (1 + R_n^2)} + \frac{2G_n W_n}{G_n^2 + W_n^2 (1 + R_n)^2} i$$
(59)

$$C_{fn} = \frac{G_n^2 + W_n^2(1+R_n) + G_n W_n P_n}{G_n^2 + W_n^2(1+R_n^2)} + \frac{W_n (1+R_n) - G_n W_n}{G_n^2 + W_n^2(1+R_n)^2} i$$
(60)

$$C_{bn} = \frac{G_n^2 - W_n^2 (1 + R_n) + G_n W_n P_n}{G_n^2 + W_n^2 (1 + R_n^2)} + \frac{W_n (1 + R_n) + G_n W_n}{G_n^2 + W_n^2 (1 + R_n)^2} i$$
(61)

gdje su:

$$P_n = 2Ck_n \tag{62}$$

$$R_n = \overline{\beta} \left( \frac{k_n}{\omega_n} \right) \tag{63}$$

$$W_n = \tan(k_n B) \tag{64}$$

$$G_n = 1 - P_n W_n \tag{65}$$

Kad se jednom odredi koeficijent refleksije C<sub>m</sub> prema jednadžbi (59), može se izračunati reflektirani spektar prema:

$$S_{\eta r}(\omega) = \left| C_{rn} \right|^2 S_{\eta i}(\omega) \tag{66}$$

gdje su:

 $S\gamma_i$  (f) funkcija spektralne gustoće dolaznih valova, [m<sup>2</sup>/s],

 $S\gamma_r$  (f) funkcija spektralne gustoće reflektiranih valova, [m<sup>2</sup>/s],

Koeficijent refleksije se računa kao modul kompleksnog broja iz jednadžbe (59).

#### Model Suh i Park, 2002, [54]

Jednostavniji model, od gore opisanog, za proračun refleksije nepravilnih valova od vertikalnog perforiranog zida, (Slika 33), su razvili također Suh i Park, 2002, [54]. Model se zasniva na modelu za pravilne valove, <u>Model Fugazza i Natale, 1992,</u> i biti će u nastavku prikazan.

Metoda proračuna se zasniva na primjeni modela za pravilne valove na svaku komponentu dolaznog valnog spektra. Koeficijent disipacije  $\beta$  se računa za svaku valnu komponentu sa istom valnom visinom H<sub>rms</sub> –srednjom kvadratnom valnom visinom. U nastavku će biti prikazane samo jednadžbe za proračun. Izvod jednadžbi je isti kakav je prikazan za metodu Natale i Fugazza, 1992.

Izdizanje fizičke površine mora se može opisati preko kompleksnog zapisa kao:

$$\eta_i(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{H_n}{2} e^{i(k_n x - \omega_n t + \varepsilon_n)}$$
(67)

Koristi se disperzijska jednadžba prema linearnoj Airy-evoj teoriji:

$$\omega_n^2 = gk_n \tanh(k_n d) \tag{68}$$

Koeficijenti za proračun koeficijenta refleksije za pojedinu n-tu komponentu valnog spektra:

$$P_n = lk_n \tag{69}$$

$$R_n = \beta_n \left(\frac{k_n}{\omega_n}\right) \tag{70}$$

$$W_n = \tan(k_n B) \tag{71}$$

$$G_n = 1 - P_n W_n \tag{72}$$

Koeficijent disipacije energije za n-tu komponentu valnog spektra:

$$\beta = \frac{8\alpha}{9\pi} H_{rms} \omega_n \frac{W_n}{\sqrt{W_n^2 (R_n + 1)^2 + G_n^2}} \frac{5 + \cosh(2k_n d)}{2k_n d + \sinh(2k_n d)}$$
(73)

$$H_{rms} = \frac{4,004\sqrt{m_0}}{1,416} \tag{74}$$

Gdje je :

#### m<sub>0</sub> nulti moment inercije dolaznog spektra izdizanja fiz. površine mora, [m<sup>2</sup>]

Nakon što se izračunaju svi potrebni parametri koeficijent refleksije za n-tu komponentu se računa pomoću izraza:

$$K_{R_n} = \frac{\left[\left(G_n^2 + W_n^2\right)^2 + W_n^2 R_n^2 \left(W_n^2 R_n^2 + 2G_n^2 - 2W_n^2\right)\right]^{0.5}}{G_n^2 + W_n^2 (1 + R_n)^2}$$
(75)

Ako se diskretna razdioba koeficijenta refleksije  $K_{Rn}$  pretvori u kontinuiranu razdiobu  $K_{R}(\omega)$ , reflektirani spektar se potom određuje kao:

$$S_{\eta r}(\omega) = K_R^{2}(\omega) S_{\eta i}(\omega)$$
(76)

## 1.5.1.2 Hidrauličko opterećenje

Prema [10], preporuka za smanjenje udarnih sila na vertikalne valobrane je primjena: perforiranih konstrukcija, kamenog nabačaja ispred konstrukcije i nekonvencionalnih alternativa u pogledu frontalne geometrije.

Opterećenja, općenito vertikalnih valobrana, pa tako i perforiranih, se mogu podijeliti u dvije osnovne kategorije, odnosno četiri podkategorije. Osnovna je podjela ( Slika 34) na udarno opterećenje za koje je vrijeme trajanja opterećenja relevantno za dinamički odaziv konstrukcije i zbog toga mu se treba posvetiti posebna pažnju i na pulsirajuće opterećenje kod kojeg je odaziv konstrukcije takav da se može pimijeniti tzv. kvazi-statički pristup (Slika 34).



Slika 34 Razlika između udarnog i pulsirajućeg opterećenja, [10].

Za različite tipove konstrukcija i različite geometrijske parametre, može se definirati mapa tipova opterećenja prema tipu konstrukcije (Slika 35).



Slika 35 Mapa tipova opterećenja vertikalnih valobrana prema tipu konstrukcije [10].

Mapa tipova opterećenja (Slika 35) je bazirana na tri bezdimenzionalna parametra:

Relativna dubina vode,  $d^* = \frac{d_b}{d}$ , Relativna valna visina,  $H_s^* = \frac{H_s}{d}$ , Relativna širina berme,  $B^* = \frac{B_b}{L_p}$ 

Relativna sila na konstrukciju,  $F_h^* = \frac{F_h}{\rho g H^2}$ .

gdje su:

- d dubina vode ispred konstrukcije, [m],
- d<sub>b</sub> visina pokosa ispred konstrukcije, [m],
- B<sub>b</sub> širina berme ispred konstrukcije, [m],

F<sub>h</sub> trenutna horizontalna sila na konstrukciju, [m],

F<sub>h,max</sub> maksimalna trenutna horizontalna sila na konstrukciju, [m],

F<sub>h.q</sub> kvazi statička horizontalna sila na konstrukciju, [m],

H<sub>S</sub> značajna valna visina ispred konstrukcije, [m],

L<sub>p</sub> vršna valna duljina ispred konstrukcije, [m],

Konstrukcije koje prema mapi tipova opterećenja (Slika 35) spadaju u kategoriju djelomično lomljenih valova ili u kategoriju udarnog opterećenja zahtijevaju dinamičku analizu opterećenja (Slika 34), dok ostala spadaju u kvazi-statičku analizu opterećenja. Djelomično lomljeni valovi se mogu ovisno o postotku lomljenih valova u odnosu na ukupan broj valova, svrstati u kvazi-statičku analizu ako je taj postotak mali.

Ovisno o namjeni opterećenja i modusu otkazivanja konstrukcije vertikalnog valobrana, može se načiniti slijedeća klasifikacija tipova opterećenja (Slika 36):

1. Kvazi-statičko opterećenje- koristi se za proračun stabilnosti konstrukcije za situacije lomljenih valova, djelomično lomljenih valova i stojnih valova prema mapi opterećenja (Slika 35),

2. Ciklično opterećenje-mjerodavno za zamor i postepeno otkazivanje konstrukcije,

3. Udarno opterećenje- koristi se za proračun stabilnosti konstrukcije za situacije djelomično lomljenih valova i udarnog opterećenja prema mapi opterećenja

Kod perforiranih konstrukcija dolazi do redukcije opterećenja iz dva osnovna razloga:

1. Redukcija valne visine uslijed disipacije energije na perforiranom zidu ima za posljedicu manje sile na konstrukciju

2. Uslijed vremenske razlike djelovanja grebena vala na perforirani zid i na stražnji nepropusni zid, ukupna horizontalna sila na konstrukciju je reducirana



Slika 36 Specifikacija valnog opterećenja za vertikalne konstrukcije.

## 1.5.1.2.1 Oscilirajuće opterećenje

Postupak proračuna kod pojave oscilirajućeg opterećenja je tzv. kvazi statički , (Slika34).

Proračun opterećenja perforiranih konstrukcija može se provesti prema dva osnovna pristupa. Prvi pristup je tzv. indirektni pristup gdje se koriste metode razvijene za vertikalne zidove bez perforacija (Goda, 1985), [43], u koje se "ubacuju" posebni koeficijenti kojima se definira perforirana konstrukcija. Drugi pristup je tzv. direktni pristup, empirijskog je tipa i biti će posebno opisan u poglavlju 1.5.2.2.

Prema prvom pristupu postoje dvije metode, koje će u nastavku biti opisane:

- 1. Metoda redukcije dolazne valne visine
- 2. Metoda redukcije sile na konstrukciju

#### Metoda redukcije dolazne valne visine

Prema metodi 1. se u proračun za opterećenje vertikalnog zida prema Godinom postupku za pulsirajuće opterećenje ulazi sa reduciranom valnom visinom. Valna visina se reducira pomoću koeficijenta redukcije:

$$K_{rH} = 1 - 1,43 \left(\frac{B}{L_p}\right) \qquad \text{za B/L<0,3}$$

$$H_{DP} = H_D K_{rH} \qquad (77)$$

gdje su:

K<sub>rH</sub> koeficijent redukcije valne visine za Godinu metodu, [43],

B širina komore perforirane konstrukcije [m]

L<sub>p</sub> deformirana vršna valna duljina ispred zida [m],

H<sub>DP</sub> valna visina ispred zida za proračun opterećenja perforiranog zida, [m],

 $H_D$  valna visina ispred zida za proračun vertikalnog zida, [m]. Valna visina se prema Godi uzima kao  $H_D=H_{max}=1,8H_s$ , gdje je  $H_s$  deformirana značajna valna visina ispred zida.

Gornja jednadžba je dobivena empirijski na osnovu brojnih ispitivanja provedenih na modelima izvedenih lukobrana sa ugrađenim perforiranim disipacijskim komorama, Porto Torres u Italiji i Dieppe Caisson u Francuskoj (Poglavlje 1.4). Prema metodi 1. se preporučuje još jedna empirijska jednadžba za proračun koeficijenta redukcije valne visine za Godinu metodu, a prema obrascu koji je dao Canel, 1995), [44]:

$$K_{rH} = \frac{\left(1 + K_R\right)}{2}$$

$$H_{DP} = H_D K_{rH}$$
(78)

gdje je:

K<sub>R</sub> koeficijent refleksije valne visine.

lako su ove metode poluempirijskog karaktera, svrstane su poglavlje analitičkih modela jer se oslanjaju na Godin postupak koji se smatra analitičkim.

Nadalje će biti objašnjen Godin postupak zbog kompletnosti metode za proračun:

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos\beta)\lambda_1 H_{DP}$$
(79)

$$p_1 = 0,5(1 + \cos\beta)(\lambda_1\alpha_1 + \lambda_2\alpha_2\cos^2\beta)\rho_g H_{DP}$$
(80)

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh kd} \tag{81}$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \tag{82}$$

$$p_4 = \alpha_4 p_1 \tag{83}$$

$$p_u = 0.5(1 + \cos\beta)\lambda_3\alpha_1\alpha_3\rho_g H_{DP}$$
(84)

gdje su:

 $\eta^{\star}$  izdizanje fizičke površine mora iznad mirnog raza (MR), [m]

 $\beta$  kut nailaska valova u odnosu na narmalu na obalnu liniju, [°],

 $\lambda_{1},\,\lambda_{2},\,\lambda_{3}$  multiplikacijski faktori ovisni o geometriji konstrukcije,

 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  multiplikacijski faktori ovisni o valnim karakteristikama.

$$\alpha_1 = 0.6 + 0.5 \left( \frac{\frac{4\pi d}{L_p}}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{L_p}\right)} \right)^2$$
(85)

$$\alpha_{2} = \min\left(\frac{\left(1 - \frac{h_{s}}{d_{b}}\right)\left(\frac{H_{DP}}{h_{s}}\right)^{2}}{3}, \frac{2h_{s}}{H_{DP}}\right)^{2}$$

$$\alpha_{3} = 1 - \left(\frac{h'}{d}\right)\left(1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L_{p}}\right)}\right)$$

$$\alpha_{4} = 1 - \frac{R_{c}^{*}}{\eta^{*}}$$

$$(88)$$

$$R_{c}^{*} = \min(R_{c}, \eta^{*})$$

$$(89)$$

gdje su:

- L<sub>p</sub> deformirana vršna valna duljina ispred zida [m],
- h<sub>s</sub> dubina vode od berme do vodnog lica [m]
- d<sub>b</sub> visina berme ispred konstrukcije, [m],
- d dubina vode ispred konstrukcije [m]
- h' uronjena dubina konstrukcije, [m],

Kada se izračunaju tlakovi po jednadžbama ((80)-(84)), moguće je nacrtati dijagrame tlakova po konstrukciji (Slika 37). Integracijom dijagrama moguće je dobiti maksimalnu horizontalnu i vertikalnu silu na konstrukciju.



Slika 37 Dijagrami opterećenja (ispod grebena) na vertikalni zid za proračun prema Godinu postupku.

#### Metoda redukcije sile na konstrukciju

Ova metoda se također zasniva na Godinom postupku za proračun vertikalnih zidova. Godin postupak je upotrijebio Takahashi, 1994, [45], za proračun perforiranih konstrukcija. Takahashi-ev postupak unaprijeđuju Tabet-Aoul i Belorgey, 1998, [46], koji se do danas uspješno primjenjuje i biti će prikazan u nastavku:





Postupak vrijedi za B/L<0,35.

 $\eta^* = 0,75(1 + \cos\beta)\lambda_{i1}H_D$ 

gdje su:

 $H_D$  valna visina ispred zida za proračun vertikalnog zida, [m]. Valna visina se prema Godi uzima kao  $H_D=H_{max}=1,8H_s$ , gdje je  $H_s$  deformirana značajna valna visina ispred zida, bez refleksije od zida.

 $\lambda_{i1}$ = multiplikacijski faktori, različiti za proračun optećenja na perforirani zid i za proračun opterećenja na stražnji zid. Za perforirani zid  $\lambda_{i1}$ =0,42, a za stražnji zid  $\lambda_{i1}$ =(0,7-B/L)<sup>2</sup>.

Proračun parametara tlaka:

$$\alpha_{1} = 0, 6 + 0, 5 \left( \frac{\frac{4\pi d}{L_{p}}}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{L_{p}}\right)} \right)^{2}$$

$$\alpha_{2} = \min\left( \frac{\left(1 - \frac{h_{s}}{d_{b}}\right) \left(\frac{H_{D}}{h_{s}}\right)^{2}}{3}, \frac{2h_{s}}{H_{D}}\right)^{2}$$

$$\alpha_{3} = 1 - \left(\frac{h'}{d}\right) \left(1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L_{p}}\right)}\right)$$

$$(91)$$

$$\alpha_{4} = 1 - \frac{R_{c}^{*}}{\eta^{*}}$$

$$(93)$$

$$R_c^* = \min(R_c, \eta^*)$$
(94)

$$\alpha^* = \max(\alpha_1, \alpha_2) \tag{95}$$

gdje su:

- $L_p \qquad \text{vršna valna duljina ispred zida [m]},$
- $h_s \qquad \text{dubina vode od berme do vodnog lica [m]}$
- $d_b \qquad \mbox{visina berme ispred konstrukcije, [m],}$
- d dubina vode ispred konstrukcije [m]
- h' uronjena dubina konstrukcije, [m],

Proračun dijagrama tlaka za perforirani zid:

$$p_{p1} = 0.5(1 + \cos\beta)(0.42\alpha_1 + (B/2L)(1 + \alpha^*)\cos^2\beta)\rho g H_D$$
(96)

$$p_{p3} = \alpha_3 p_{p1}$$
(97)

$$p_{p4} = \alpha_4 p_{p1} \tag{98}$$

Proračun dijagrama tlaka za stražnji zid:

$$p_{r1} = 0.5(1 + \cos\beta)((0.7 - B/L)^2\alpha_1 + (0.43 - B/L)(1 + \alpha^*)\cos^2\beta)\rho_g H_D$$
(99)

$$p_{r3} = \alpha_3 p_{r1}$$
(100)

$$p_{r4} = \alpha_4 p_{r1} \tag{101}$$

Proračun horizontalne sile na perforirani zid:

$$F_{p} = \left[ \left( p_{p1} + p_{p3} \right) \frac{d}{2} + \left( p_{p1} + p_{p4} \right) \frac{R_{C}^{*}}{2} \right] (1 - p)$$
(102)

gdje je:

p poroznost perforiranog zida [1],

Proračun horizontalne sile na stražnji zid:

$$F_{r} = \left[ \left( p_{r1} + p_{r3} \right) \frac{d}{2} + \left( p_{r1} + p_{r4} \right) \frac{R_{C}^{*}}{2} \right]$$
(103)

Rezultantna horizontalna sila:

S obzirom na vremensku razliku djelovanja sile na perforirani zid i na stražnji zid, uvodi se faktor vremenske razlike djelovanja sila  $\chi$ .

$$F_{uk} = \chi \left( F_p + F_r \right) \tag{104}$$

$$\chi = 1 - 0.36(B/L) + 7.4(B/L)^2 - 62.1(B/L)^3 + 116.3(B/L)^4$$
(105)
## 1.5.2 Empirijski matematički modeli

#### 1.5.2.1 Hidraulička funkcionalnost

Eksperimenti načinjeni na Sveučilištu u Hannoveru (GWK), sa jednom komorom, pokazuju da su hidrauličke osobine takove konstrukcije u funkciji refleksijskog parametra RP za pravilne i nepravilne valove definirane prema jednadžbi iz elaborata [10]:

$$RP = \frac{\left(\frac{H_i}{d}\right)^{0.65}}{p^{0.95}}$$
 (106)

gdje su:

H<sub>i</sub> dolazna valna visina [m],

d dubina vode [m],

p poroznost vertikalnog zida [1].

U [10] je definiran izraz za koeficijent refleksije (KR) u obliku polinoma drugog stupnja, u funkciji parametra (B/L). Gdje je B širina komore, a L valna duljina vala:

$$K_R = 18.6 \left(\frac{B}{L}\right)^2 - 7.3 \left(\frac{B}{L}\right) + 0.98$$
(107)

U prilagodbi krivulje pri izvodu ove jednadžbe autori su koristili mjerenja sa pravilnim i sa nepravilnim valovima, što je vrlo općenita generalizacija. Iz toga proizlazi da je upitna valna duljina u parametru B/L, jer nema isto značenje za pravilne i za nepravilne valove.

U radu [17] preporučen je empirijski izraz za nepravilne valove:

$$K_R = \sin\left\{k_c \left[\left(\frac{B}{L_s}\right) - k_x\right]^2\right\} + k_y$$
(108)

gdje su:

- kc određuje oblik krivulje, niže vrijednosti (600) rezultiraju plitkom krivuljom "u"
   oblika i veće vrijednosti (900) rezultiraju strmijom krivuljom "v" oblika,
- $k_x$  vrijednost B/L<sub>s</sub> kojoj pripada najniža vrijednost koeficijenta refleksije K<sub>R</sub>,
- ky najniža vrijednost koeficijenta K<sub>R</sub>.

	Promjer perforacije perforiranog zida	k <sub>c</sub>	k <sub>x</sub>	k <sub>y</sub>
sa jednim perforirani m zidom	1 x A2	910	0,225	0,280
	2 x A2	780	0,223	0,315
sa dva perforiran a zida	1 x A2	750	0,250	0,265
	2 x A2	750	0,250	0,275

Tablica 1Koeficijenti u jednadžbi (108), [17].

## 1.5.2.2 Hidrauličko opterećenje

U poglavlju 1.5.1.2 definirani su dva osnovna pristupa proračunu sila na konstrukciju: direktni i indirektni pristup. Indirektni pristup je objašnjen u poglavlju 1.5.1.2, a ovdje će biti objašnjena direktna metoda koja je empirijskog karaktera. Izvedena je na osnovu laboratorijskih istraživanja provedenih na Sveučilištu u Hanoveru.

Metoda vrijedi samo za pulsirajuće opterećenje. Ukupna horizontalna sila na perforirani zid F<sub>uk</sub>, [kN/m] je dana jednadžbom, [10]:

$$F_{uk} = 12 \tanh^{1.1} \left( 0.009 \frac{\left(\frac{d}{B}\right)^{2/3}}{\frac{H_D}{L_p}} \right) \rho_g H_D$$
(109)

gdje su:

 $H_D$  valna visina ispred zida za proračun vertikalnog zida, [m]. Valna visina se uzima kao  $H_D=H_{max}$  gdje je  $H_{max}$  deformirana maksimalna valna visina ispred zida, bez refleksije od zida.

- B širina komore perforirane konstrukcije [m]
- L<sub>p</sub> deformirana vršna valna duljina ispred zida [m],
- d dubina vode ispred konstrukcije [m]

Jednadžba vrijedi za perforirane konstrukcije sa jednom i sa više komora, bez temeljnog nasipa i za poroznosti zidova koje su definirane na donjoj slici.





# 2 Valolom

### 2.1 Definicija valoloma

Konstrukcije sa nisko postavljenom krunom iznad ili ispod morske razine, paralelne sa obalom nazivamo zajedničkim imenom valolomi.

Valolomi su konstrukcije koje imaju sljedeću zadaću:

- smanjuju valove i time štite obalu, obalne građevine i građevine u moru
- smanjuju preljevanje obalnih građevina
- smanjuju sile na obalne građevine
- smanjuju eroziju obale
- omogućuju taloženje sedimenta

Mogu biti konstruirani kao pojedinačna konstrukcija (Slika 40a) ili kao višestruka konstrukcija(Slika 40b).

Pojedinačna konstrukcija se koristi za zaštitu lokaliziranog područja dok se višestruka konstrukcija koristi za zaštitu dužeg dijela obale.

Uronjene konstrukcije mogu biti građene kao neprekinute konstrukcije u kojima otvori za cirkulaciju vode nisu potrebni. U slučaju konstrukcija sa niskom krunom ili blago uronjenih konstrukcija otvori za cirkulaciju vode se u svakom slučaju moraju osigurati radi prolaza brodova.

Slika 40c prikazuje shemu neprekinutog uronjenog valoloma sa malim otvorima unutar konstrukcije. Također su prikazana bočna uronjena pera koja formiraju konfiguraciju ćelije u kojoj se zadržava pješčana ispuna.

Pojedinačne konstrukcije, (Slika 40a), se najčešće grade u dubinama većim od 3-4 m kako bi se smanjila ili spriječila erozija obale te se u isto vrijeme stvara zaštićeno područje za rekreaciju i pristanište za brodove.

Višestruki valolomi su izgrađeni u veoma plitkoj vodi dubine tek nekoliko metara blizu obalne linije sa jednim ciljem, a to je zaštita plaže od erozije i plavljenja nižih područja.

Izgrađeni na određenoj udaljenosti od obale imaju za cilj zaštitu plaže te stvaranje prostora za rekreaciju.

Konstrukcije su najčešće izgrađene od kamenog materijala, (poprečni presjeci, Slika 40). Ako nije dostupan kameni materijal odgovarajuće veličine, za oblogu se koriste betonski blokovi.

Obalni zid ili obaloutvrde su najčešće konstruirane uz obalu kao dio sheme konstrukcije sa niskom krunom u cilju ojačanja jako izloženih obala.

Valolom - Prednosti i nedostaci

Prednosti - primjene valoloma u odnosu na klasične nasipne lukobrane

- manja cijena,
- manje narušavaju vizure na povijesnu i urbanu arhitekturu i prirodne ljepote
- ne zauzimaju puno prostora

#### Nedostaci

- propuštaju dio valne energije u štićeni prostor
- slabo uočljivi za brodove i čamce



Slika 40 Primjeri tlocrta i poprečnih presjeka valoloma

U okviru međunarodnog projekta DELOS obrađivani su različiti tipovi valoloma. Projekt DELOS obuhvaća pregled i sistematizaciju postojećeg znanja o valolomima, provedbu novih eksperimenata u laboratorijima i na terenu, razvoj numeričkih i empirijskih modela, [24].

### 2.2 Funkcija valoloma

#### 2.2.1 Interakcija valoloma sa valovima, strujama i nanosom

Funkcija valoloma korištenih za stabilizaciju plaža je redukcija valne energije u njihovoj zavjetrini s čime se smanjuje pronos nanosa valovima prema obali.

Mogu se konstruirati tako da smanje ili spriječe eroziju postojeće plaže, ili da podrže prirodno taloženje sedimenta kako bi se formirala nova plaža.

Valolomi reduciraju nadolazeću valnu energiju duž konstrukcije induciranjem loma vala kod i na konstrukciji, parcijalnom refleksijom valova i disipacijom kroz porozno tečenje u konstrukciji. Ovo je prikazano za izronjenu konstrukciju na donjoj slici.



Slika 41 Hidrodinamički procesi na valolomu.

Za redukciju energije najvećim dijelom je odgovorno lomljenje valova, manjim dijelom refleksija i najmanjim dijelom tečenje kroz porozno tijelo valoloma.

Valna energija je također transmitirana horizontalno difrakcijom i refrakcijom oko glava konstrukcije u zavjetrinu valoloma, kao što je prikazano na donjoj slici za izranjajuću konstrukciju.

U slučaju niže izranjajuće konstrukcije sa ograničenim prelijevanjem dominantna će biti horizontalna transmisija valne energije. Što je niža kruna to će biti dominantniji valni poremećaj uzrokovan valovima koji prelijevaju. Za duge uronjene konstrukcije valni poremećaj je uzrokovan najvećim dijelom transmisijom valova preko krune.

Iza konstrukcija sa niskom krunom se deponira i zadržava materijal sa obale, ovisno o stupnju zaklona konstrukcije. Ako se radi o srednjem stupnju zaklona sediment će se pojaviti kao ispupčenje na obali plaže, (Slika 43b). Ako se radi o većem stupnju zaklona, rezultirajuća obala dopire do valoloma formirajući sprud, (Slika 43a).



Slika 42 Ilustracija formiranja obale.



Slika 43 Ilustracija potpunog i nepotpunog taloženja sedimenta.

Aktualne morfodinamičke promjene su uvelike rezultat struja; i to ne samo struja generiranih plimom i osekom nego i strujama generiranih interakcijom vala i valoloma, na samoj konstrukciji i oko konstrukcije.

Valovi koji prelaze preko i pokraj valoloma rezultiraju transportom vode iza konstrukcija, te tako induciraju veću razinu iza konstrukcije. Ova pojava stvara prolaz vode kroz poroznu konstrukciju ali što je još važnije, stvara i horizontalne struje i vrtloge u zavjetrini.



Slika 44 Prikaz formiranih potpunih i nepotpunih sprudova iza valoloma na umjetnoj plaži Pedregalejo, Malaga, Španjolska.

Režimi strujanja se razlikuju za uronjene i izranjajuće konstrukcije. (Slika 45 i Slika 46)



Slika 45 Valovima inducirane struje iza izronjenog valoloma bez transmisije valova preko konstrukcije.

Transport vode u zonu zavjetrine uzrokuje podizanje razine vode u zavjetrini koje je u ravnoteži sa izlaznim strujanjem kroz otvore između valoma. Izlazno strujanje djeluje erodirajuće na glave valoloma i dno otvora za cirkulaciju, (Slika 46).



Slika 46 Valovima inducirane struje kod uronjenog valoloma sa transmisijom valova preko krune valoloma.

Kao i sve ostale konstrukcije i konstrukcije sa niskom krunom imaju svoje nedostatke. Sprudovi koji se formiraju iza valoloma mogu biti smetnja strujama kod dugih obala kao i transportu sedimenta i skoro uvijek uzrokuju nizvodnu eroziju obale sa jednim dominantnim smjerom transporta sedimenta uz obalu, (Slika 47).



Slika 47 Nizvodna erozija i uzvodno taloženje uzrokovano formiranjem sprudova između obale i valoloma.

Na određenoj lokaciji niže konstrukcije su jeftinije za izgradnju ali su manje efikasne u umanjivanju valne energije od konstrukcija sa krunom iznad površine vode. Kako bi se postigla optimalna konstrukcija potrebno je pronaći ravnotežu između ova dva aspekta.

### 2.2 Podjela valoloma

Valolomi se dijele prema uronjenosti krune, materijalu obloge i poprečnom presjeku.

- 1. Prema uronjenosti krune razlikuju se:
  - valolomi sa uronjenom krunom; (Slika 2.8)
  - valolomi sa krunom iznad mirnog raza (MR); (Slika 2.9).



Slika 48 Valolom sa uronjenom krunom.



Slika 49 Valolom sa krunom iznad MR.

2. Prema materijalu obloge:

od kamenih blokova,

- od betonskih blokova,
- od asfalta,
- od betona.
- 3. Prema poprečnom presjeku:
  - sa bermama; (Slika 50),
  - bez bermi; (Slika 51).



Slika 50 Valolom sa bermama.



Slika 51 Valolom bez bermi.

### 2.3 Transmisija valova

Kod projektiranja i optimalizacije valoloma potrebna je informacija o veličini valne energije koju propušta valolom za određenu geometriju konstrukcije. Pri prelasku valova preko valoloma događa se:

- proces loma vala i
- proces prijelaza valne energije na više harmonike.

Matematičko modeliranje takve hidrodinamike je vrlo kompleksna zadaća i danas je još uvijek predmet napora znanstvenih istraživanja. Postoje numerički modeli za modeliranje transmisije preko valoloma koji su kompleksni i nedovoljno verificirani [56], [57]. Zatim analitički modeli koji su uglavnom razvijani za lom valova na nagnutoj obali i primjenjeni za lom na valolomu [58]. Fizikalni procesi loma na valolomu i nagnutoj obali su slični ali se ipak razlikuju te je stoga takve modele potrebno korigirati i primjenjivati u ograničenim uvjetima. Empirijski modeli za modeliranje transmisije preko valoloma su trenutačno najviše istraživani (DELOS projekt) i dovoljno verificirani, a i jednostavni za primjenu. Stoga će se u ovom radu koristiti empirijski modeli.

Transmisija valova se karakterizira koeficijentom transmisije,  $K_T$ , koji se za pravilne valove računa kao:

$$K_T = \frac{H_i}{H_i} \tag{110}$$

a za nepravilne kao:

$$K_T = \frac{H_{si}}{H_{si}} \tag{111}$$

## 2.3.1 Valolomi sa kamenom oblogom



Slika 52 Defninicija oznaka za valolom.

1. Empirijska jednadžba, [59], ima oblik:

$$K_T = 1 - \exp\left(-0.65\frac{F}{H_{si}} - 1.09\frac{H_{si}}{B_v}\right) + 0.047\left(\frac{B_v F}{L_p D_{n50}}\right) - 0.067\left(\frac{H_{si} F}{B_v D_{n50}}\right), \quad (112)$$

gdje su:

F dubina vode na valolomu, [m],

 $H_{si}$  značajna visina vala ispred valoloma, [m], (preporuča se  $H_{si} = 4\sqrt{m_0}$ ),

B<sub>v</sub> širina krune valoloma, [m],

L<sub>p</sub> vršna valna duljina dolaznog vala, [m],

D<sub>n50</sub> veličina srednjeg zrna obloge valoloma, [m].

2. Empirijski model iz rada, [60], se sastoji od dvije jednadžbe u ovisnosti o vrijednosti odnosa  $B_{\nu}\!/H_{si.}$ 

$$K_{T} = -0.4 \frac{F}{H_{si}} + 0.64 \left(\frac{B_{v}}{H_{si}}\right)^{-0.31} \times \left(1 - e^{-0.5\xi}\right), \qquad B_{v} / H_{si} < 10$$

$$K_{T} = -0.35 \frac{F}{H_{si}} + 0.51 \left(\frac{B_{v}}{H_{si}}\right)^{-0.65} \times \left(1 - e^{-0.41\xi}\right), \qquad B_{v} / H_{si} > 10$$
(113)

gdje su:

$$\xi$$
 Irribarenov parametar,  $\xi = tg\alpha/(s_{op})^{0.5}$ ,  $s_{op} = 2\pi H_{si}/(gT_p^2)$ 

a ostali parametri su prethodno objašnjeni.

Obje formule su ograničene min. i max. vrijednostima. Za uske krune koeficijenti iznose 0.07 i 0.8; za široke krune 0.05 i  $K_{Tu} = -0.006 \frac{B_v}{H_{si}} + 0.93$ .

Prijelaz sa jedne na drugu jednadžbu nije kontinuiran. Ako je potreban prijelaz, preporuča se da se prva formula koristi za vrijednosti  $B_v / H_{si} \le 8$ , a druga formula za  $B_v / H_{si} \ge 12$ . Za vrijednosti između potrebno je izvršiti linearnu interpolaciju između vrijednosti  $B_v / H_{si} = 8$  i 12.

3. Empirijska jednadžba temeljena na istraživanju iz rada [61]:

$$K_{T} = \frac{1}{1.18 \left(\frac{H_{si}}{F}\right)^{0.12} + 0.33 \left(\frac{H_{si}}{F}\right)^{1.5} \frac{B_{v}}{\sqrt{H_{si}L_{p}}}} \qquad za \qquad 2 \ge \left(\frac{F}{H_{si}}\right) \ge 0.83$$
(114)

Ako je vrijednost F/H<sub>si</sub> manja od 0.83 potrebno je izvršiti linearnu interpolaciju za vrijednosti 0<F/H<sub>si</sub> <0,83. Postupak je slijedeći: gornja vrijednost ima za apcisu vrijednost 0.83 i određen K<sub>T</sub> prema gornjoj formuli, a donja vrijednost ima za apcisu vrijednost 0 i K<sub>T</sub> određen prema donjoj formuli. Zatim se za stvarni F/H<sub>si</sub> očita vrijednost K<sub>T</sub>.

$$K_T = \left[\min(0.74; \ 0.62\xi^{0.17}) - 0.25\min\left(2.2; \ \frac{B_v}{\sqrt{H_{si}L_p}}\right)\right]^2,$$
(115)

Projekt DELOS je također dao rezultate s obzirom na kosi nailazak valova na obalnu liniju i transmisiju, [62]. Zaključak je da kut nailaska valova manji od 70° nema utjecaja na transmisiju valova, (0° je okomit nailazak valova). Ovaj zaključak znači da prethodne empirijske jednadžbe razvijene za okomit nailazak valova se mogu koristiti i za valove čiji je kut gibanja manji od 70°.

Kod kosog gibanja valova postavlja se pitanje da li je kut gibanja transmitiranih valova sličan kutu dolaznih valova. Istraživanje je pokazalo da je kut gibanja transmitiranih valova manji od kuta dolaznih valova:

 $\beta_t$  = 0.80  $\beta_i$ , za nasipne konstrukcije sa kamenom oblogom,

gdje su:

- $\beta_t$  kut gibanja transmitiranih valova, [°],
- $\beta_l$  kut nailaska dolaznih valova, [°].

## 2.3.2 Valolomi sa glatkom oblogom

Valolomi ne moraju nužno biti obloženi kamenim nabačajem. Ponekad glatki i nepropusni valolomi mogu biti pokriveni asfaltom ili pojačani sa potpornim zidom. Često su nagibi pokosa tih valoloma blaži (1:3 ili 1:4), nego kod valoloma sa kamenom oblogom, uglavnom zbog konstruktivnih razloga.

Transmisija vala preko glatkih valoloma je drugačija od one preko valoloma sa kamenom oblogom. Transmisija vala kod glatkih valoloma je veća za krunu iste visine, zato što nema disipacije energije zbog trenja i poroznosti, što nije slučaj kod valoloma sa kamenom oblogom (javlja se disicipacija). Nadalje, širina krune nema nikakav utjecaj ili ima zanemarivo mali utjecaj na transmisiju. Ako je glatki valolom jako širok i potopljen, širina krune može blago utjecati na transmisiju vala.

Asfaltni ili betonski valolomi i valolomi pojačani potpornim zidom izvode se uglavnom na suhom, a ne pod vodom. Prisutnost plime i oseke omogućuje da se takve konstrukcije izvode na suhom.

Pošto su glatki valolomi drugačiji od valoloma obloženih kamenim nabačajem, postoje i različite formule za koeficijent transmisije i utjecaj valova pod kutem. Transmisija valova se može računati prema radu [62]:

$$K_{T} = [-0.3F/H_{si} + 0.75[1 - exp(-0.5\xi)]]\cos^{2/3}\beta$$
(116)

sa minimumom  $K_T$ =0.075 i maksimumom  $K_T$ =0.8, te slijedećim ograničenjima:

 $1 < \xi < 3$   $0^{\circ} \le \beta \le 70^{\circ}$   $1 < B_{v}/H_{si} < 4$ 

Jednadžba (116) uzima u obzir kosu (bočnu) valnu transmisiju putem izraza  $\cos^{2/3}\beta$ . Iz eksperimenata je jasno vidljivo da se valna transmisija smanjuje sa povećanim kutom nailaska vala. Slika 53 pokazuje tu ovisnost. Na ordinati se nalazi mjereni transmisijski koeficijent u odnosu sa jednadžbom (116), bez utjecaja  $\cos^{2/3}\beta$ .

Valovi pod kutem također imaju utjecaj na kut gibanja transmitiranog vala, i to na drugačiji način nego kod valoloma sa kamenom oblogom. Do kuta od 45°, kut transmitiranog vala je sličan kutu incidentnog vala. Iznad 45° valovi preskaču preko konstrukcije i stvaraju transmitirani kut vala od 45°, neovisno o incidentnom kutu. Stoga:

 $\beta_t = \beta_i$  za  $\beta_i \le 45^\circ$ 

 $\beta_t = 45^\circ$  za  $\beta_i > 45^\circ$  za konstrukcije sa glatkom oblogom.



Slika 53 Utjecaj kuta nailaska valova na transmisiju za valolome sa glatkom oblogom.

## 2.4 Spektralna deformacija uslijed transmisije valova

Transmitirani spektri su često drugačiji od incidentnih spektara. Val koji se lomi preko valoloma može generirati dva ili više transmitirana vala na strani iza valoloma. Efekt je taj da je prisutno više energije na višim frekvencijama, nego kod incidentnih valova. Generalno, vršni period je veoma blizu incidentnom vršnom periodu, ali srednji period se može značajno smanjiti. Prva analiza te teme se može naći u [63].

Koeficijent transmisije valova sadrži samo informacije o visinama valova iza konstrukcije. Spektar je taj koji sadrži informacije o valnim periodima. Često se zahtijeva, uz informaciju o valnim visinama, i informacija o valnom periodu, npr.: kod penjanja vala po pokosu (run-up) ili preljevanja konstrukcija iza valoloma, za proračun morfoloških promjena.

Slika 54 pokazuje primjer transmitiranog spektra za glatki valolom i daje jasni uvid u to da je energija na višim frekvencijama raspoređena jednoliko. Bazirano na tome, Van der Meer, [63], je razvio jednostavan i grub model, (Slika 55). U prosjeku, 60% transmitirane energije je prisutno u području od < 1.5 f<sub>p</sub>. Ostalih 40% energije je raspodjeljeno između 1.5 f<sub>p</sub> i 3.5 f<sub>p</sub>.

Podaci o podjeli energije na odnos 60% / 40% i max. frekvencija od f<sub>max</sub> =  $3.5 f_p$ , bazirani su na ograničenom broju ispitivanja. Pretpostavke iz rada [63] su nadopunjene novim podacima DELOS projekta, vidi [62] i [64].



Slika 54 Primjer transmitiranog spektra preko valoloma sa glatkom oblogom.



Slika 55 Preporučena metoda proračuna deformacije transmitiranog valnog spektra preko valoloma sa glatkom oblogom, [63].

Zaključak je taj da su krajnji rezultati slični predloženoj metodi, (Slika 55), premda valolomi od kamenog nabačaja daju malo manje vrijednosti, nego glatki valolomi. U [64] je navedena tematika još detaljnije analizirana i zaključeno je da se valolomi od kamenog nabačaja i glatki valolomi ne ponašaju slično. Metoda se također može primjeniti na potopljene valolome sa kamenom oblogom, ali ne i na valolome sa krunom iznad površine vode. U slučaju valoloma sa krunom iznad površine, mnogo manje energije prelazi na višu frekvenciju , te se f<sub>max</sub> može približiti 2.0 f<sub>p</sub>. Potrebno je više istraživanja da se navedena metoda poboljša.

## 2.4.1 Distribucija valne visine nakon loma u plitkom području

U plitkoj vodi Rayleigh-ova distribucija podcjenjuje manje valne visine, a precjenjuje veće. Postoji nekoliko radova koji se bave poluempirijskom prilagodbom Rayleighove distribucije kojom se obuhvaća utjecaj plitke vode i loma valova. Nadalje će biti prikazan postupak iz rada [71].

Model iz rada [71] sadrži kombinaciju dvije Weibull-ove distribucije koje prezentira linearna funkcija za niže valne visine i nelinearna funkcija za više valne visine, ograničene lomom. Linearna i nelinearna distribucija se sastaju na prijelaznoj valnoj visini H<sub>Tr</sub> koja je dana slijedećom jednadžbom:

$$H_{Tr} = (0.35 + 5.8 \tan \theta) \cdot h$$
 (117)

gdje su:

h lokalna dubina vode [m],

 $\theta$  kut nagiba dna, [°],

Rezultirajući karakteristični valovi  $H_{1/3}$ ,  $H_{1/10}$ ,  $H_{2\%}$ ,  $H_{1\%}$ ,  $H_{0.1\%}$  su prikazani u radu [71]., normalizirani sa  $H_{rms}$ :

$$H_{\rm rms} = \left(2.69 + 3.24 \,\frac{\sqrt{m_0}}{h}\right) \sqrt{m_0} \tag{118}$$

gdje je:

m<sub>0</sub> površina ispod funkcije gustoće energije dolaznog valnog spektra, [m<sup>2</sup>]

Donja tablica prikazuje neke normalizirane vrijednosti  $H_{1/3}$  i  $H_{2\%}$  u odnosu na  $H_{Tr}$  u rasponu od 0.05-3.00.

H <sub>Tr</sub> /H <sub>rms</sub>	$H_{1/3}/H_{rms}$	$H_{2\%}/H_{rms}$
0.05	1.279	1.548
0.50	1.280	1.549
1.00	1.324	1.603
1.20	1.371	1.662
1.35	1.395	1.717
1.50	1.406	1.778
1.75	1.413	1.884
2.00	1.415	1.985
2.50	1.416	1.978
3.00	1.416	1.978

Tablica 2 Karakteristične bezdimenzionalne valne visine.



Slika 56 Karakteristični valne visine  $H_{1/3}$ ,  $H_{1/10}$ ,  $H_{2\%}$ ,  $H_{1\%}$ ,  $H_{0,1\%}$ , za proračunate  $H_{rms}$  i  $H_{Tr}$  prema jednadžbama (117) i (118).

## 2.5 Refleksija valova

Što se tiče valne transformacije preko valoloma sa kamenom oblogom, DELOS projekt se usredotočio samo na valnu transmisiju. Valna refleksija nije uzimana u obzir, te su se njome bavili samo na kraju projekta. Ovdje su navedeni preliminarni rezultati za valolome sa kamenom oblogom.

Valna refleksija kod konstrukcija kod kojih ne dolazi do preljevanja, je opisana u [65]. Za konstrukcije od kamena izvor podataka je [66] i [67]. Najjednostavnija formula za predviđanje u [65] je:

$$K_{\rm R} = 0.14\xi^{0.73} za \xi < 10$$
 (119)

Ta je formula, zajedno sa orginalnim podacima, prikazana na slici Slika 57. Razrađenija formula za kose kamene nagibe u [65] je:

$$K_{\rm R} = 0.071 {\rm P}^{-0.82} \cot \alpha^{-0.62} {\rm s_{op}}^{-0.46}$$
(120)

U toj formuli kut nagiba ima malo veći utjecaj od strmosti valova. Propusnost tijela valoloma ima malen utjecaj, vidi Van der Meer, [66]. Kod konstrukcija sa preljevanjem, vrijednost P će često biti blizu P = 0.4-0.6, a utjecaj kuta nagiba će se smanjiti ako konstrukcija dospije još više pod vodu. Stoga je jednadžba (119) uzeta za usporedbu.



Slika 57 Refleksija od nepreljevnih nasutih konstrukcija sa kamenom oblogom, [65].

Očekuje se da će potopljeni valolomi imati manju refleksiju nego konstrukcije bez preljevanja, zbog činjenice da će više energije otići preko konstrukcije. Također se očekuje da relativna visina krune R<sub>c</sub>/H<sub>s</sub> ima najveći utjecaj na moguću redukciju

koeficjenta refleksije. Širina krune nema utjecaj, zato što se valovi reflektiraju samo od strane konstrukcije okrenute moru.

Unutar DELOS projekta postoje 4 skupa podataka o valolomima sa niskim krunama:

UPC: 2D ispitivanja u velikom mjerilu na Polytechnic University of Catalonia, Španjolska. Sve skupa 63 ispitivanja.

UCA: 2D ispitivanja u malom mjerilu na University of Cantabria, Španjolska. Sve skupa 53 ispitivanja.

UB: 3D ispitivanja na Aalborg University, Danska by University of Bologna. Sve skupa 28 ispitivanja (slučajni valovi).

INF: 3D ispitivanja na Aalborg Universityby Infram. Sve skupa 19 ispitivanja (valolomi od kamenog nabačaja, okomiti nailazak vala).

Usporedba koeficijenata refleksije, (Slika 57), pokazuje značajno raspršenje, zbog različitih razloga. No bilo je jasno da su niže konstrukcije uistinu i dale nižu refleksiju. Da bi se smanjilo raspršenje i došlo do zaključaka o redukciji refleksije kod valoloma niske krune, uzeti su prosjeci grupa sličnih podataka. Nadalje, uvedena je pretpostavka da će za najviše testirane konstrukcije (F/H<sub>si</sub> > 0.5) utjecaj na refleksiju biti veoma malen ili nepostojeći.

Bazirano na ovim pretpostavkama, određena je redukcija u prosječnim koeficijentima refleksije za skupine podataka od 4 spomenuta skupa. Donja slika daje konačni graf, koji se još uvijek mora razmatrati kao preliminarani rezultat.



Slika 58 Koeficijent redukcije, f<sub>r</sub>, koeficijenta refleksije za uronjene valolome sa kamenom oblogom.

Redukcijski faktor f<sub>r</sub> za redukciju K<sub>R</sub> za valolome s niskom krunom je:

 $\begin{array}{ll} f_r = 0.2 \; F/H_{si} + 0.9 & za \; F/H_{si} < 0.5 \\ f_r = 1 & za \; F/H_{si} \ge 0.5 \end{array} \tag{121}$ 

Redukcijski faktor f<sub>r</sub> u jednadžbi (121) se može upotrijebiti kod refleksijskih koeficijenata utvrđenih jednadžbom (119) ili kod drugih postojećih jednadžbi za valnu refleksiju. Jednadžba (121) vrijedi za valolome sa kamenom oblogom. Ne postoji druga metoda za glatke valolome, nego također korištenje jednadžbe (121), ali sada primjenjene na formulu predviđanja za glatke konstrukcije bez preljevanja. Takva formula predviđanja se može naći u [65].

### 2.6 Stabilnost valoloma

Na stabilnost valoloma će utjecati dubina vode na valolomu tj. oscilacije na tom mjestu jer što je veća dubina npr. za vrijeme plima oluja to će veći valovi dolaziti na valolom. Iz tog razloga se pri određivanju stabilnosti valoloma moraju razmatrati sve kombinacije valova i visina vodnog lica.

Veliki doprinos istraživanju stabilnosti valoloma su dali autori radova [68], [69] i [70] Autor rada [68], je ispitivao dubinski neograničene valove i dokazao da je kruna najnestabilniji dio tijela valoloma, ako je potopljen, a ako nije najnestabilniji dio tijela je stražnji pokos valoloma. Autori rada [70], su dali sljedeće zaključke:

- Valolom je malo stabilniji ako valovi dolaze pod kutem na valolom nego samo okomito.
- Duži i manje strmiji valove rade veću štetu valolomu nego kratki.
- Širina kruna ne utječe značajno na stabilnost valoloma.
- Povećanjem dubine iznad valoloma stabilnost obloge se povećava.

Nadalje su još rađeni AAU 2002 i NRC 1992 testovi koji su davali slične međusobne zaključke. Kruna je najnestabilniji dio tijela ali s povećenjem dubine stabilnost raste. Na slici, Slika 59, su uspoređeni rezultati stabilnosti za krunu. Vidi se da za potopljene valolome svi autori dobivaju identična rješenja, dok za lagano izdignute valolome pojavljuju se manja odstupanja.





Preporuke za stabilnost tijela valoloma:

Širina krune bi trebala biti najmanje kao najveća značajna visina dolaznog vala, ili bar tri širine kamene obloge.

Ako je za očekivati da će valolom biti izložen djelovanju valova pod kutem cijeli dio oko krune treba napraviti od iste kamene obloge.

Budući da su valolomi prilično plitke konstrukcije i utrošak materijala nije toliko značajan kao kog lukobrana, preporuča se da nagibi pokosa budu bar 1:2.

Utjecaj oblika i granulacije kamene obloge ne utječe značajno na stabilnost valoloma, čak i za vrijednosti manje od  $D_{85}/D_{15}$ <2, ali se preporuča granična vrijednost  $D_{85}/D_{15}$ <2.

Na temelju gore navedenih istraživanja i dijagrama, (Slika 59), definirana je formula koja daje najnepovoljnije rezultate koji su na strani sigurnosti, [24]:

$$\frac{H_{si}}{\Delta D_{n50}} = 0.06 \left(\frac{F}{D_{n50}}\right)^2 - 0.23 \frac{F}{D_{n50}} + 1.36 \qquad za \qquad -3 \le F / D_{n50} < 2,$$
(122)

gdje su:

H<sub>si</sub> značajna valna visina, [m],

F dubina vode na valolomu, [m],

D<sub>n50</sub> nominalni promjer zrna obloge, [m],

$$\Delta = (\rho_r - \rho_w) / \rho_w \tag{123}$$

- $\rho_r$  gustoća obloge, [kg/m<sup>3</sup>],
- $\rho_{_{\scriptscriptstyle W}}$  gustoća vode, [kg/m<sup>3</sup>].

# 3 Cilj istraživanja

Najgrublje rečeno, cilj istraživanja je ispitivanje hidrauličkog međudjelovanja valoloma i perforiranog vaobrana.

Kod pomorskih konstrukcija svaku građevinu projektiramo kroz:

- proračune funkcionalnosti i
- proračune konstrukcije.

#### Proračun funkcionalnosti

Tokom projektiranja, vrši se proračun funkcionalnosti građevine koji se za pomorske građevine razlikuje za različite tipove građevina. Proračunom funkcionalnosti se dokazuje da će u predviđenom vijeku korištenja, projektirana građevina biti izvan funkcije, ili nefunkcionalna, samo određeni broj dana. Na funkcionalnost pomorskih građevina uglavnom utječe hidrodinamika mora, pa je u ovom radu korišten pojam hidraulička funkcionalnost.

#### Proračun konstrukcije

Razlikujemo proračune konstrukcije za "fleksibilne" hidrotehničke građevine i za "krute" hidrotehničke građevine.

Za "fleksibilne" hidrotehničke građevine se proračun uglavnom odnosi na proračun hidrauličke stabilnosti od gibanja vode (obloga lukobrana, obloga valoloma).

Za "krute" hidrotehničke građevine se proračun vrši prema EUROCODE-u što uključuje: proračune nosivosti (stabilnost i čvrstoća), proračune uporabljivosti i proračune trajnosti.

Za proračune konstrukcije "fleksibilne" hidrotehničke građevine (valolom) i za proračune nosivosti "krute" hidrotehničke građevine (perforirani valobran), potrebno je poznavati optrećenja koja djeluju na građevinu. Jedno od bitnih opterećenja je opterećenje od gibanja (hidrodinamike) mora i naziva se hidrauličko opterećenje.

U ovom radu je obrađeno međudjelovanje valoloma i perforiranog valobrana kroz dva osnovna aspekta:

- hidraulička funkcionalnost i
- hidrauličko opterećenje.

U nastavku su dana objašnjenja pojmova hidraulička funkcionalnost i hidrauličko opterećenje za svaku građevinu pojedinačno (perforirani valobran i valolom) i za interakciju tih dviju građevina.

### 3.1 Perforirani valobran

### 3.1.1 Hidraulička funkcionalnost

Pod pojmom funkcioniranja valobrana podrazumjeva se mogućnost korištenja valobrana većinu vremena u vijeku eksploatacije građevine.

Valobrani su građevine na granici između mora i kopna i koriste se za prijelaz ljudi ili roba s mora na kopno i obrnuto te za zaštitu akvatorija. Da bi se odvijao nesmetani prijelaz ljudi ili roba potrebno je osigurati dovoljno mirno more ispred valobrana radi mirnoće plovila i osigurati nepreljevanje krune radi sigurnosti na obali. Stoga kada govorimo o hidrauličkoj funkcionalnosti perforiranog valobrana govorimo o:

- refleksijskim karakteristikama i
- preljevanju krune.

Valovi koji se generiraju na pučini su tzv. dolazni valovi i ovise o brzini vjetra koji ih generira, trajanju vjetra i duljini privjetrišta na kojem nastaju. Dolazni valovi dolaze u blizinu obale (u prijelazno područje), gdje se deformiraju ovisno o batimetrijskim karakteristikama priobalja. Deformirani dolazni valovi se pri nailasku na obalnu konstrukciju djelom disipiraju, a dijelom reflektiraju. Reflektirana valna energija se superponira sa dolaznom valnom energijom. Valne visine koje se javljaju ispred obalnih građevina su rezultat dolaznih valova i reflektiranih valova. Na veličinu reflektiranih valova možemo utjecati odabirom tipa konstrukcije i konstrukcijskih detalja.

Odabirom perforiranog valobrana i određenih konstrukcijskih karakteristika utječe se na reflektiranu valnu energiju na taj način da se dobivaju manje reflektirane valne visine nego kod klasičnog valobrana tipa zid. U poglavlju 1.3 Parametri koji utječu na hidrauličku funkcionalnost (refleksijske karakteristike) i hidrauličko opterećenje, opisan je utjecaj konstrukcijskih detalja na refleksijske karakteristike perforiranog valobrana, a samim time i na preljevanje krune.

## 3.1.2 Hidrauličko opterećenje

Za "krute" hidrotehničke građevine, u koje spada i perforirani valobran, se proračun konstrukcije vrši prema EUROCODE-u. Proračun uključuje: proračune nosivosti (stabilnost i čvrstoća), proračune uporabljivosti i proračune trajnosti.

Za proračune stabilnosti i čvrstoće potrebno je poznavati sve sile koje djeluju na građevinu, a to su u slučaju obalnih građevina sile od valova, od tla iza zida, pokretno opterećenje na kruni, opterećenje od potresa i opterećenje od broda.

Hidrauličko opterećenje je opterećenje od djelovanja valova na perforirani valobran, a proračunava se kao dijagram tlaka. Ispod valnog grebena su najveće horizontalne brzine vode u smjeru kretanja vala. Uslijed toga, najveći tlakovi pri nailasku vala na vertikalnu konstrukciju javljaju se kada greben vala nailazi na konstrukciju. Na donjoj slici prikazani su dijagrami tlakova koji se pojavljuju u trenutcima  $t_1$ ,  $t_2$  i  $t_3$ , odnosno trenutcima kada se greben nalazi na prednjem zidu ( $t_1$ ), na stražnjem zidu ( $t_2$ ) i poslije refleksije opet na prednjem zidu u smjeru pučine ( $t_3$ ).





## 3.2 Valolom

## 3.2.1 Hidraulička funkcionalnost

Valolomi su zaštitne građevine koje iniciraju lom valova i s time smanjuju valne visine u avatoriju kojeg štite. Svojom geometrijom, prije svega uronjenošću i širinom krune, utječu na intezitet i trajanje loma, a time i na količinu disipirane valne energije, odnosno na valne visine iza valoloma. Kada se govori o valnoj energiji koja je prešla preko valoloma govorimo o transmisiji valova. Također ovisno o geometriji valoloma, dolazi do refleksije valova u polje od kuda su došli. Ukupna energija dolaznih valova je jednaka zbroju transmitirane, reflektirane i disipirane valne energije. Znači, kada se govori o hidrauličkoj funkcionalnosti valoloma tada se podrazumjevaju:

- transmisijske i
- refleksijske karakteristike.

Odabirom geometrije valoloma utječemo na transmisiju i refleksiju valova. U poglavlju 2 Valolom opisan je utjecaj geometrije na funkcioniranje valoloma.

### 3.2.2 Hidrauličko opterećenje

Za "fleksibilne" hidrotehničke građevine se proračun konstrukcije uglavnom odnosi na proračun hidrauličke stabilnosti od gibanja vode (obloga valoloma). Hidraulička stabilnost valoloma podrazumjeva stabilnost elementa obloge valoloma pod hidrauličkim opterećenjem valova. Za proračun stabilnosti obloge je potrebno poznavati projektne valne visine (hidrauličko opterećenje) iz kojih se može definirati minimalna veličina zrna obloge koja garantira stabilnu oblogu valoloma (poglavlje 2.6 Stabilnost valoloma).

### 3.3 Hidraulička interakcija perforiranog valobrana i valoloma

Određene inženjerske situacije mogu zahtjevati manje valne visine ispred perforiranog valobrana, nižu krunu obale ili manju eroziju nožice temeljnog nasipa. U tom slučaju je moguće koristiti kombinaciju perforiranog valobrana i valoloma.



Slika 61 Definicija problema.

### 3.3.1 Hidraulička funkcionalnost

Kako je u prethodnim poglavljima opisano, funkcionalnost valobrana određuju:

- preljevanje i
- refleksija valova,

a funkcionalnost valoloma određuje:

- transmisija preko valoloma i
- refleksija od valoloma.

U ovom radu će se u prvi plan istaknuti akvatorij između valoloma i valobrana kao onaj koji služi za manevar i privez plovila. Stoga se neće uzimati u razmatranje akvatorij od valoloma prema pučini i kopneno područje na kruni valobrana. Na taj način se iz razmatranja izbacuju fenomeni refleksije od valoloma i preljevanja valobrana. Time su fizikalni procesi koji određuju funkcionalnost zajedničkog djelovanja ove dvije građevine pojednostavljeni i prikladniji za izučavanje. Do sada nisu provedena ispitivanja hidrauličkog međudjelovanja ove dvije konstrukcije te je stoga neophodno ovakvo pojednostavljenje da bi se mogli razlučiti osnovni fizikalni procesi međudjelovanja.

Dakle, pojam hidrauličke funkcionalnosti zajedničkog djelovanja valoloma i perforiranog valobrana podrazumjeva:

- transmisijske karakteristike valoloma i
- refleksijske karakteristike valobrana,

One određuju valne visine između valoloma i valobrana. Preko valoloma se transmitira određena valna energija u vidu transmitirane valne visine H<sub>t</sub>, (Slika 62). Valovi valne visine H<sub>t</sub> napreduju do perforiranog valobrana i reflektiraju se od njega u vidu reflektirane valne visine H<sub>tr</sub>. Maksimalne valne visine koje se pojavljuju između valoloma i valobrana jednake su superpoziciji valnih visina H<sub>t</sub> i H<sub>tr</sub>, za pravilne valove, tako da vrijedi prema [73] :

$$H_{\sup} = H_t + H_{tr} \tag{124}$$



Slika 62 Definicijska skica hidrauličke funkcionalnosti međudjelovanja valoloma i perforiranog valobrana za pravilne (monokromatske) valove.

Nepravilni valovi se opisuju spektralnim i statističkim metodama. Jedna kratkoročna valna pojava definirana je funkcijom spektralne gustoće energije valova,  $S\eta$ (f), (spektralni opis), ili statističkim reprezentom valne visine, npr. značajnom valnom visinom, H<sub>s</sub>. Kod nepravilnih valova vrijedi procijena superpozicijom valnih energija oscilatornih valova prema [72]:

$$H_{s-\sup} = 4 \cdot \sqrt{\int_{0}^{\infty} \left[ S_{\eta t}(f) + S_{\eta tr}(f) \right] df}$$
(125)



Slika 63 Definicijska skica hidrauličke funkcionalnosti međudjelovanja valoloma i perforiranog valobrana za nepravilne (spektralne) valove.

Transmisija preko valoloma i refleksija od valobrana ovise o geometrijskim karakteristikama tih konstrukcija i parametrima dolaznih valova. Obje pojave, transmisija za djelovanje samo valoloma i refleksija za djelovanje samo valobrana, su do sada dobro izučene s tim da postoje matematički modeli koji povezuju funkcionalne karakteristike pojedinih građevina sa njihovom geometrijom i parametrima dolaznih valova. Zadaća ovog rada će biti upotrijebiti postojeće matematičke modele razvijene posebno za valolom i posebno za perforirani valobran, da bi se ispitivalo zajedničko djelovanje ove dvije građevine. Formiranjem novog matematičkog modela biti će moguće ispitivati utjecaj geometrijskih karakteristika valoloma i perforiranog valobrana na valne visine (H<sub>sup</sub>, H<sub>s-sup</sub>) u akvatoriju između građevina.

## 3.3.2 Hidrauličko opterećenje

Kako je u prethodnim poglavljima opisano za proračun nosivosti valobrana potrebno je definirati hidrauličko opterećenje valobrana.

Za proračun stabilnosti valoloma potrebno je definirati mjerodavne valne parametre (hidrauličko opterećenje) za proračun stabilnosti obloge valoloma.

Hidraulička interakcija ove dvije građevine kroz aspekt hidrauličkog opterećenja podrazumjeva:

- utjecaj valoloma na opterećenje perforiranog valobrana i
- utjecaj perforiranog valobrana na opterećenje valoloma.

U ovom radu se neće proučavati utjecaj perforiranog valobrana na opterećenje valoloma.

Osnovna tema sa aspekta hidrauličkog opterećenja će biti utjecaj valoloma na opterećenje perforiranog valobrana.

Preko valoloma se transmitira određena valna energija u vidu transmitirane valne visine  $H_t$ , (Slika 64). Valovi valne visine  $H_t$  napreduju do perforiranog valobrana i uzrokuju tlakove na konstrukciju na način kako je to prikazano na donjoj slici. Kada greben vala naiđe na perforirani zid opterećuje ga dijagramom tlaka (crveno) u trenutku  $t_1$ , greben nadalje putuje prema stražnjem nepropusnom zidu i opterećuje ga dijagramom tlaka (zeleno) u trenutku  $t_2$ . Dolazi do refleksije grebena vala i promjene putanje grebena koji putuje u smjeru valoloma. Kada ponovo nailazi na perforirani zid opterećuje ga dijagramom tlaka (plavi) u trenutku  $t_3$ , ali u suprotnom smjeru. Maksimalno opterećenje valobrana nastaje u onom trenutku kada je vektorski zbroj rezultantnih sila pojedinih dijagrama tlakova (Slika 64), maksimalan.

Opterećenje perforiranog valobrana, kod pravilnih valova, ovisi o transmitiranoj valnoj visini H<sub>t</sub>, koja ovisi o geometrijskim karakteristikama valoloma i spada u kategoriju hidrauličke funkcionalnosti valoloma. Također, opterećenje perforiranog valobrana ovisi i o geometrijskim karakteristikama perforiranog valobrana (poglavlje 1.5.1.2.1).



Slika 64 Definicijska skica hidrauličkog opterećenja interakcije valoloma i perforiranog valobrana za pravilne (monokromatske) valove.

Opterećenje perforiranog valobrana, kod nepravilnih valova, ovisi o transmitiranoj značajnoj valnoj visini H<sub>st</sub>, koja ovisi o geometrijskim karakteristikama valoloma i

spada u kategoriju hidrauličke funkcionalnosti valoloma. Također, opterećenje perforiranog valobrana ovisi i o geometrijskim karakteristikama perforiranog valobrana (poglavlje 1.5.1.2.1).



Slika 65 Definicijska skica hidrauličke stabilnosti međudjelovanja valoloma i perforiranog valobrana za nepravilne (spektralne) valove.

Transmisija preko valoloma i opterećenje valobrana ovise o geometrijskim karakteristikama tih konstrukcija i parametrima dolaznih valova. Obje pojave, transmisija za djelovanje samo valoloma i opterećenje za djelovanje samo valobrana, su do sada dobro izučene s tim da postoje matematički modeli za proračun transmisije preko valoloma i opterećenja valobrana. Zadaća ovog rada će biti upotrijebiti postojeće matematičke modele razvijene posebno za valolom i posebno za perforirani valobran, da bi se ispitivalo zajedničko djelovanje ove dvije građevine. Formiranjem novog matematičkog modela biti će moguće ispitivati utjecaj geometrijskih karakteristika valoloma i perforiranog valobrana.

# 4 Istraživanje

### 4.1 Opis istraživanja za hidrauličku funkcionalnost

Istraživanje hidrauličke interakcije valoloma i perforiranog valobrana sa aspekta hidrauličke funkcionalnosti je vršeno uz pomoć matematičkih modela i fizikalnog modela. Na donjoj slici, (Slika 66), prikazan je postupak istraživanja koji obuhvaća istraživanje za perforirani valobran, za valolom i na kraju za interakciju perforiranog valobrana i valoloma. Istraživanje prema shemi na donjoj slici je načinjeno za pravilne valove i za nepravilne valove.



Slika 66 Shema istraživanja hidrauličke funkcionalnosti interakcije perforiranog valobrana i valoloma.

## 4.1.1 Perforirani valobran

#### Ograničenja modela

Predmetno istraživanje bazirati će se na dvodimenzionalnim matematičkim i fizikalnim modelima , odnosno imati će samo dvije osi kartezijevog koordinatnog sustava, u smjeru gibanja valova i dubinu. 2D istraživanje je odabrano s obzirom da fenomen interakcije još nije istraživan te ne postoje rezultati istraživanja koji bi se mogli nadograđivati odnosno koristiti kao podloga daljnjim istraživanjima. Tek nakon što se u potpunosti istraži interakcija u valnom kanalu (2D), biti će moguće nadograđivati postojeća ispitivanja na 3D modelu.

Utjecaj pojedinih parametara konstrukcije i valova na hidrauličku funkcionalnost perforiranog valobrana je prikazan u poglavlju 1.3 Parametri koji utječu na hidrauličku funkcionalnost (refleksijske karakteristike) i hidrauličko opterećenje. Ograničenja koja su uvedena po pitanju parametara valova i konstrukcije su prikazana u narednoj tablici.

Farametri koji utjeću na murauličku funkcionamost				
Poroznost i oblik perforacija	vertikalni uzdužni otvori, poroznost 30%			
Visina perforiranog dijela prema visini neperforiranog prednjeg vertikalnog zida	potpuno perforirani prednji zid			
Širina komore, B, i valna dužina deformiranog vala, L, (B/L)	0 <b l<0.5<="" td=""></b>			
Gornja ploča konstrukcije	bez gornje ploče iznad komore			
Temeljni nasip	bez temeljnog nasipa			
Kut nailaska valova	okomito na obalnu liniju			
Strmost valova	1/12 < H/L < 1/25 1/12 < H <sub>s</sub> /L <sub>p</sub> < 1/25			
Balast unutar komore	bez balasta			
Geometrijsko oblikovanje konstrukcije	bez specifičnog oblikovanja			
Lom valova	bez loma valova			
Preljevanje krune	bez preljevanja krune			

#### Parametri koji utječu na hidrauličku funkcionalnost

Tablica 3Ograničenja parametara koji utječu na hidrauličku funkcionalnost<br/>perforiranog valobrana.

### 4.1.1.1 Odabir matematičkog modela za analizu hidrauličke funkcionalnosti

U postojećoj znanstvenoj literaturi postoje različiti matematički modeli koji služe za dimenzioniranje i optimalizaciju perforiranih valobrana, za pravilne i za nepravilne valove.

Matematički modeli koji se koriste za ispitivanje hidrauličke funkcionalnosti se dijele na analitičke, empirijske i numeričke. U ovom radu su prikazani neki analitički matematički modeli (poglavlje 1.5.1 Analitički matematički modeli) i empirijski matematički modeli (poglavlje 1.5.2 Empirijski matematički modeli). Numerički matematički modeli se mogu naći u radovima [2], [3], [4], [16], [42] i [48].

Različiti matematički modeli su verificirani za različite raspone valnih parametara i geometrijskih parametara konstrukcija. Pri odabiru matematičkog modela za predmetno istraživanje tražen je model jednostavnostavan za primjenu u inženjerskoj praksi i model koji je referenciran u više znanstvenih radova.

Korišten je analitički matematički model prikazan u poglavlju 1.5.1.1.1, za pravilne valove.

Primjenom matematičkog modela na određenu perforiranu konstrukciju dobije se rezultat u obliku reflektirane valne visine koji se koristi za proračun hidrauličke funkcionalnosti prema poglavlju 3.1.1 Hidraulička funkcionalnost .

Korišten je analitički matematički model prikazan u poglavlju 1.5.1.1.2, za nepravilne valove, (Suh i Park, 2002, [54]).

Primjenom matematičkom modela na određenu perforiranu konstrukciju dobije se rezultat u obliku funkcije reflektirane spektralne gustoće, odnosno značajne valne visine, koji se koristi za proračun hidrauličke funkcionalnosti prema poglavlju 3.1.1 Hidraulička funkcionalnost.

Verifikacija modela od strane autora Suh i Park, [54], je načinjena za nepravilne valove, za raspone strmosti valova od 1/20-1/100, za širine perforirane komore B=15, 30, 45 i 60cm, dubinu vode d=40cm, vertikalni uzdužni otvori, potpuno perforirani prednji zid, bez gornje ploče na komori, bez temeljnog nasipa, bez loma valova i bez preljevanja krune.

Verifikacija modela za pravilne valove je načinjena prema rezultatima iz rada [13], koji nije javno publiciran te su detalji nedostupni.

### 4.1.1.2 Eksperimentalna istraživanja – fizikalni model

Eksperimentalna istraživanja su načinjena u Hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu.

Ispitivanje funkcionalnih karakteristika perforiranog valobrana načinjeno je u valnom kanalu prikazanom na donjoj slici.





Mjerna oprema sastoji se od generatora valova sa ugrađenim AWACS sustavom, te sustava za prikupljanje podataka.

Generator valova je "piston" tip kojeg proizvodi DHI (Horsholm, Denmark). Osnovne komponente uređaja su:

- motor Yasakawa Type SGMGH-20DCA6F-OY
- kontroler motora Yasakawa Type SGDH-20DE
- servo kontroler -DHI AWACS Type 422/2-E
- feedback transducer Gefran LT-M-750S
- feedback pojačalo DHI Type 118
- optički konverter DHI Type 122
- software za servo DHI Wave Synthesizer, ver. 2.40
- DHI Standard Cabinet Type 101E
- DHI Wave Amplifier Type 102E
- DHI Filter Cabinet Type 154/IF
- Elevacija vodnog lica mjeri se kapacitivnim sondama- DHI


Slika 68

Motor i ploča generatora

Slika 69

Napajanje i servo uređaj



Slika 70 Digitalni servo kontroler Slika 71 Upravljačka jedinica

Baždarenje mjerne opreme je napravljeno tako da se mjerio koeficijent refleksije od vertikalnog zida. Poznato je da je teorijski koeflcijent refleksije  $K_R$ =1, a eksperimentalni,  $K_R$ =0,9. Mjerenjima u kanalu dobivene su vrijednosti kao na slici:



Slika 72 Rezultati baždarenja mjerne opreme, odnosno mjerenja koeficijenta refleksije od vertikalnog zida za pravilne i nepravilne valove.

Rezultati baždarenja su zadovoljavajući s obzirom da su izmjerene vrijednosti koeficijenata refleksije ~0,9. U području strmosti većih od ~0,03 nema rezultata baždarenja sa monokromatskim valovima. Razlog tome je što je nemoguće vršiti mjerenja u tom području sa monokromatskim valovima, zbog pojave bočne refleksije koja stvara dodatne amplitude valova na sondama i dobivaju se nerealni koeficijenti refleksije. Pojava bočne refleksije je najintezivnija kod monokromatskih valova i kod visokih koeficijenata refleksije. U slučaju,  $K_R=0,9$ , superpozicijom dolazne i reflektirane valne visine se strmost poveća gotovo dva puta. Kod tako velikih strmosti je bočna refleksija najintezivnija. Smanjenjem koeficijenta refleksije smanjuje se strmost superponiranih valova i bočna refleksija se smanjuje. Koliko se smanjuje bočna refleksija smanjenjem koeficijenta refleksije je potrebno odrediti dodatnim ispitivanjima na fizikalnom modelu.

Strmosti valova kojima su vršena ispitivanja ovog rada općenito, Tablica 4 i Tablica 5 se kreću u rasponu od 0,04-0,083 koje nije pokriveno rezultatima baždarenja sa gornje slike za monokromatske valove. Ipak, mjerenja u tom području je moguće ostvariti jer na valolomu dolazi do loma vala, smanjenja valne visine i smanjenja strmosti superponiranih valova. Također, strmiji valovi iz Tablica 4 i 5 se od perforiranog zida reflektiraju sa manjim koeficijentom refleksije te je i zbog toga

manja strmost superponiranih valova, što omogućuje izradu mjerenja prema tablicama: Tablica 4 i Tablica 5.

#### Valni prametri za eksperimentalna ispitivanja

Valni parametri s kojima su vršena eksperimentalna ispitivanja perforiranog valobrana su definirani u idućoj tablici.

MONO					
Eksperiment	na modelu T [s]	na modelu H [m]	na modelu L [m]	L/H	
1	0,68	0,06	0,72	12	
2	0,81	0,06	1,02	17	
3	1,01	0,06	1,50	25	
4	0,89	0,10	1,20	12	
5	1,10	0,10	1,70	17	
6	1,45	0,10	2,50	25	
7	0,99	0,12	1,44	12	
8	1,24	0,12	2,04	17	
9	1,68	0,12	3,00	25	

Tablica 4Valni parametri korišteni za ispitivanje hidrauličke funkcionalnosti<br/>perforiranog valobrana za pravilne (monokromatske) valove.

SPEKT					
Eksperiment	na modelu T <sub>p</sub> [s]	na modelu H <sub>s</sub> [m]	na modelu L <sub>p</sub> [m]	$L_{p/H_s}$	
1	0,68	0,06	0,72	12	
2	0,81	0,06	1,02	17	
3	1,01	0,06	1,50	25	
4	0,89	0,10	1,20	12	
5	1,10	0,10	1,70	17	
6	1,45	0,10	2,50	25	
7	0,99	0,12	1,44	12	
8	1,24	0,12	2,04	17	
9	1,68	0,12	3,00	25	

Tablica 5Valni parametri korišteni za ispitivanje hidrauličke funkcionalnosti<br/>perforiranog valobrana za nepravilne (spektralne) valove, JONSWAP<br/>spektar.





#### Opis fizikalnog modela

U valni kanal je smješten drveni model perforiranog valobrana na udaljenosti 15,7m od valnog generatora (Slika 74). Ispred modela smješteno je pet kapacitivnih sondi, (G3-G7), za mjerenje fizičkog izdizanja površine vode. Razdvajanje dolaznog i reflektiranog spektra iz zapisa na sondama G3-G7 je vršeno pomoću metode definirane u radu [55]. Sonde G1 i G2 su služile za mjerenje dolaznih valova koje je generirao generator valova. Sonda  $G_8$  je korištena kao kontrolna sonda elevacije ispred perforiranog zida. Mjerenje je vršeno pet minuta za svaki val iz tablica: Tablica 4 i Tablica 5.





Model perforiranog valobrana je izrađen od drveta sa poroznošću 30% i vertikalnim uzdužnim otvorima, te širinom disipacijske komore B=0,18m.



Slika 75 Prikaz modela perforiranog valobrana smještenog u valnom kanalu za ispitivanje hidrauličke funkcionalnosti (refleksijskih karakteristika).



Slika 76 Fotografija modela perforiranog valobrana prije ugradnje u kanal.

Načinjeno je ukupno 18 ispitivanja prema tablicama: Tablica 4 i Tablica 5. Kako je navedeno, sondama G3-G7, je moguće razdvojiti dolazne i reflektirane valne visine te se na taj način za pravilne valove dobiva eksperimentalni koeficijent refleksije  $K_R$  od perforiranog valobrana prema jednadžbi (1).

Kod nepravilnih valova se, također, pomoću sondi G3-G7 mogu razdvojiti dolazni i reflektirani spektar iz kojih je moguće eksperimentalno dobiti funkciju koeficijenta refleksije  $K_R(f)$  prema jednadžbi (2) ili koeficijent refleksije  $K_R$  prema jednadžbi (3).

## 4.1.1.3 Kalibracija matematičkog modela pomoću rezultata fizikalnog modela

Kalibracija matematičkog modela, za pravilne valove, prikazanog u poglavlju 1.5.1.1.1 i matematičkog modela, za nepravilne valove, prikazanog u poglavlju 1.5.1.1.2, je načinjena pomoću koeficijenta kontrakcije izlaznog mlaza iz perforacije zida,  $C_c$ , definiranog u jednadžbi (16). Prema [35] preporučuje se,  $C_c$ =0,4-0,8. Kalibracija koeficijenta  $C_c$  je načinjena minimizacijom srednje kvadratne greške

Kalibracija koeficijenta, C<sub>C</sub>, je načinjena minimizacijom srednje kvadratne greške proračunatih i eksperimetalno dobivenih koeficijenata refleksije K<sub>R</sub>, posebno za pravilne i posebno za nepravilne valove. Za pravilne valove proračunat je koeficijent Cc=0,8, a za nepravilne Cc=0,7.



Slika 77 Usporedba koeficijenata refleksije K<sub>R</sub> dobivenih eksperimentalno i teorijski za koeficijent kontrakcije Cc=0,8, za pravilne valove; B širina komore perforiranog valobrana; L-valna duljina.



Slika 78 Usporedba koeficijenata refleksije K<sub>R</sub> dobivenih eksperimentalno i teorijski za koeficijent kontrakcije Cc=0,7, za nepravilne valove; B širina komore perforiranog valobrana; L<sub>s</sub>-značajna valna duljina.

U formiranju novog matematičkog modela za proračun hidrauličke funkcionalnosti interakcije valobrana i valoloma koristiti će se kalibrirani matematički modeli za pravilne i nepravilne valove.

# 4.1.2 Valolom

#### <u>Ograničenja modela</u>

Utjecaj pojedinih parametara konstrukcije i valova na hidrauličku funkcionalnost valoloma je prikazan u poglavlju 2.5 Refleksija valova. Ograničenja koja su uvedena po pitanju parametara valova i konstrukcije su prikazana u narednoj tablici.

Parametri koji	utječu na	hidrauličku	funkcionalnost

Uronjenost krune valoloma, F/H <sub>si</sub>	uronjena kruna 0,5 - 1,67	
Nagib pokosa valoloma	1:2	
Veičina zrna obloge, D <sub>n50</sub>	bez kamene obloge, glatka obloga	
Relativna širina krune, B <sub>v/</sub> H <sub>si</sub>	1,33 - 2,67	
Kut nailaska valova $eta_{ extsf{i}}$	okomito na obalnu linju	
Relativna dubina vode ispred valoloma, d/L <sub>p</sub>	0,13 - 0,55	
Strmost valova	1/12 < H/L < 1/25 1/12 < H <sub>s</sub> /L <sub>p</sub> < 1/25	

Tablica 6Ograničenja parametara koji utječu na funkcionalnost valoloma,<br/>(oznake prema slici: Slika 52).

Realno je za očekivati da se u najvećoj mjeri koriste valolomi sa kamenom oblogom, u odnosu na one sa glatkom oblogom (betonskom, asfaltnom). U eksperimentalnim istraživanjima ovog rada će biti korišten valolom sa glatkom oblogom. Odabir valoloma sa glatkom oblogom je načinjen iz razloga što oprema laboratorija i metodologija izvođenja pokusa zahtjeva veliki broj premještanja valoloma, što bi u slučaju kamene obloge zahtjevalo znatan ljudski rad i bitno povećanje troškova izvođenja pokusa.

S obzirom na odabir glatke obloge valoloma, potrebno je poznavati dali postoji mogućnost poopćenja rezultata istraživanja sa glatkim valolomom na valolom sa kamenom oblogom. U tu svrhu načinjena su neka prethodna istraživanja pomoću empirijskih formula za proračun transmisije za valolom sa glatkom oblogom i za valolom sa kamenom oblogom. Svrha je bila ispitati koliko se razlikuje koeficijent transmisije za valolom određene geometrije sa kamenom i sa glatkom oblogom.





Prema gornjoj usporedbi može se zaključiti da glatka obloga propušta više energije nego kamena obloga jer se ne događa disipacija energije uslijed trenja kao sa hrapavom oblogom. Razlike u koeficijentu transmisije su zanemarive pa se prema ovom kriteriju rezultati istraživanja sa glatkim valolomom mogu primjeniti za valolom sa kamenom oblogom.

S druge strane postavlja se pitanje dali se isto može načiniti i prema kriteriju deformacije spektra (poglavlje 2.4 Spektralna deformacija uslijed transmisije valova). Nešto više o tome je opisano u istom poglavlju i u radovima [62], [63] i [64] . U ovom radu će se zbog malog utjecaja deformacije spektra na hidrauličku funkcionalnost zanemariti razlike između glatke i kamene obloge te se zaključuje da rezultati dobiveni pomoću glatkog valoloma vrijede i za valolom sa kamenom oblogom. Sva ispitivanja u ovom radu će biti vršena sa valolomom sa glatkom oblogom.

## 4.1.2.1 Odabir matematičkog modela za analizu hidrauličke funkcionalnosti

U postojećoj znanstvenoj literaturi postoje matematički modeli koji služe za dimenzioniranje i optimalizaciju valoloma, za nepravilne valove. Za pravilne valove se

koriste numerički i analitički modeli, dok empirijskih modela za pravilne valove nema u postojećoj objavljenoj literaturi.

U ovom radu su prikazani samo empirijski matematički modeli (poglavlje 2.3 Transmisija valova). Numerički matematički modeli se mogu naći u radovima [56] i [57], a analitički u radu [58].

Različiti matematički modeli su kalibrirani i verificirani za različite raspone valnih parametara i geometrijskih parametara konstrukcije. Pri odabiru matematičkog modela za predmetno istraživanje tražen je model jednostavnostavan za primjenu u inženjerskoj praksi, model koji je referenciran u više znanstvenih radova i model za koji je moguće izraditi eksperimentalna istraživanja s obzirom na ograničenja u laboratoriju.

U ovom radu će se koristiti empirijski modeli za proračun transmisije preko valoloma. Odabrani su empirijski modeli jer su u okviru DELOS projekta izrađeni na osnovu najvećeg broja eksperimenata te su višestruko referencirani i preporučeni u stručnoj literaturi. Numerički i analitički modeli su još uvijek u fazi razvoja za proračun valovanja preko valoloma.

U radu će se koristiti empirijski matematički model za glatki valolom prikazan u poglavlju 2.3.2 Valolomi sa glatkom oblogom, za nepravilne valove. Primjenom empirijskog matematičkog modela na određenu konstrukciju valoloma dobije se rezultat u obliku transmitirane valne visine, (koeficijenta transmisije), koji se koristi za proračun hidrauličke funkcionalnosti prema poglavlju 3.2.1. Hidraulička funkcionalnost.

## 4.1.2.2 Eksperimentalna istraživanja – fizikalni model

Opis mjerne opreme s kojom su rađena eksperimentalna istraživanja dan je u poglavlju 4.1.1.2 Eksperimentalna istraživanja – fizikalni model.

#### Valni prametri za eksperimentalna ispitivanja

Valni parametri s kojima su vršena eksperimentalna ispitivanja valoloma su definirani u tablicama Tablica 4 za pravilne valove i Tablica 5 za nepravilne valove.

#### <u>Opis fizikalnog modela</u>

U valni kanal je smješten drveni model valoloma na udaljenosti 9,5m od valnog generatora. Ispitivanje je vršeno sa dvije uronjenosti krune valoloma, F=0,06m, (Slika 80), i F=0,1m, (Slika 81). Ispred modela smještene su tri kapacitivne sonde, (G2-G4), za mjerenje dolaznih valova, a poslije valoloma četiri sonde, (G5-G8), za mjerenje transmitiranih valova preko valoloma. Razdvajanje dolaznog i reflektiranog spektra iz

zapisa na sondama je vršeno pomoću metode definirane u radu [55]. Sonda G1 je služila kao kontrolna sonda elevacije ispred generatora.



Slika 80 Uzdužni presjek valnog kanala sa smještajem modela valoloma i kapacitivnih sondi za uronjenost krune F=0,06m.



Slika 81 Uzdužni presjek valnog kanala sa smještajem modela valoloma i kapacitivnih sondi za uronjenost krune F=0,1m.

Model valoloma je izrađen od drveta sa širinom krune  $B_v=0,16m$ , nagibima pokosa 1:2 i sa mogućnošću mjenjanja dubine uronjenosti tako da se mogu postići dvije dubine 0,06m i 0,1m.



Slika 82 Prikaz modela valoloma za ispitivanje hidrauličke funkcionalnosti (transmisijskih karakteristika), za uronjenost krune valoloma, F=0,06m, i F=0,1m.



Slika 83 Model valoloma postavljen u kanal.

Načinjeno je ukupno 18 ispitivanja prema tablicama:Tablica 4 i Tablica 5. Mjerenjem dolaznih valnih visina, sonde (G2-G4), i mjerenjem transmitiranih valnih visina, sonde (G5-G8), može se odrediti eksperimentalni koeficijent transmisije valoloma prema jednadžbi (110) za pravilne valove i (111) za nepravilne valove.

## 4.1.2.3 Kalibracija matematičkog modela pomoću rezultata fizikalnog modela

S obzirom da ne postoji empirijski matematički model za proračun transmisije preko valoloma za pravilne valove potrebno je obaviti kalibraciju postojećeg modela (jednadžba (116)) načinjenog za nepravilne valove tako da se on može primjeniti i za pravilne valove.

Na donjoj slici, (Slika 84), je prikazana usporedba koeficijenta transmisije dobivenog eksperimentalno i pomoću empirijske jednadžbe (116), za pravilne valove (crne točkice). Podaci dobiveni mjerenjem su manji od onih proračunatih jednadžbom.

Stoga je potrebno korigirati jednadžbu (116), tako da daje manje rezultate u skladu sa mjerenjima. Načinjena je prilagodba pravca na postojeće rezultate. Jednadžba pravca je:

$$y = 1,5 \cdot x - 0,44 \tag{126}$$

Empirijska jednadžba za koeficijent transmisije (jednadžba (116)) se korigira gornjim pravcem, na slijedeći način:





$$K_{\rm T} = 1.5 \cdot [-0.3 \frac{\rm F}{\rm H_i} + 0.75 \, [1 - \exp(-0.5\xi)]] - 0.42$$
 (127)

gdje je:

F dubina vode na valolomu, [m],

H<sub>i</sub> visina vala ispred valoloma, [m],

$$\xi$$
 Irribarenov parametar,  $\xi = tg\alpha/(s)^{0.5}$ ,  $s = 2\pi H_i/(gT^2)$ 

Dobivena jednadžba je nova jednadžba za proračun koeficijenta transmisije preko glatkog valoloma za pravilne valove.

Na donjoj slici, (Slika 85), prikazano je poklapanje mjerenih koeficijenata transmisije i proračunatih pomoću kalibrirane jednadžbe (127), za pravilne valove.



Slika 85 Usporedba koeficijenata transmisije dobivenih eksperimentalno i teorijski pomoću kalibrirane empirijske jednadžbe (127), za pravilne valove.

Za nepravilne valove je načinjena verifikacija empirijske jednadžbe (116), pomoću eksperimentalnih rezultata. Poklapanje rezultata na donjoj slici, (Slika 86), je zadovoljavajuće.





U formiranju novog matematičkog modela za proračun hidrauličke funkcionalnosti interakcije valobrana i valoloma koristiti će se kalibrirani empirijski matematički model za pravilne i verificirani za nepravilne valove.

# 4.1.3 Interakcija perforiranog valobrana i valoloma

#### Ograničenja modela

Ograničenja modela koja su uvedena po pitanju parametara valova i konstrukcije za perforirani valobran, (Tablica 3) i za valolom, (Tablica 6) vrijede i za interakciju.

#### 4.1.3.1 Odabir matematičkog modela za analizu hidrauličke funkcionalnosti

U postojećoj znanstvenoj literaturi ne postoje matematički modeli za ispitivanje interakcije perforiranog valobrana i valoloma. Postoje modeli za ispitivanje ove dvije konstrukcije zasebno. U ovom radu će se koristiti superpozicija analitičkog matematičkog modela (1.5.1 Analitički matematički modeli) i empirijskog matematičkog modela (poglavlje 2.3.2 Valolomi sa glatkom oblogom) za proračun hidrauličke funkcionalnosti interakcije valoloma i valobrana prema opisu danom u poglavlju 3.3.1 Hidraulička funkcionalnost.

Pri prelasku nepravilnih valova preko valoloma dolazi do pojave deformacije valnog spektra (poglavlje 2.4 Spektralna deformacija uslijed transmisije valova). Efekt deformacije valnog spektra će biti uključen u novi matematički model prema postupku definiranom u radu [63].

Na ovaj način, superpozicijom analitičkog i empirijskog matematičkog modela, te uključenjem deformacije valnog spektra se dobiva hibridni matematički model, kojim se može ispitivati interakcija ove dvije građevine za različite valne parametre i parametre konstrukcije.

U matematičkom modelu nije uključen utjecaj udaljenosti valoloma od perforiranog valobrana, L<sub>p</sub>, pa će stoga na fizikalnom modelu biti ispitan utjecaj udaljenosti L<sub>p</sub> na hidrauličku funkcionalnost interakcije, i biti uključen u hibridni matematički model.

Radi razumijevanja rada u nastavku će se ponoviti jednadžbe iz prethodnih poglavlja, a koje čine novi matematički model.

Novi matematički model za proračun hidrauličke funkcionalnosti, **za pravilne valove** se sastoji od sustava slijedećih jednadžbi:

1. Proračun transmisije preko valoloma:

Koristi se jednadžba (127):

$$K_{T} = 1.5 \cdot [-0.3 \frac{F}{H_{i}} + 0.75 [1 - exp(-0.5\xi)]] - 0.42$$
,  $0 > K_{T} > 1$  (128)

$$H_t = K_T H_i \tag{129}$$

gdje su:

- F dubina vode na valolomu, [m],
- $\xi$  Irribarenov parametar,  $\xi = tg \alpha / (s)^{0.5}$ ,  $s = 2\pi H_i / (gT^2)$
- T period dolaznog vala, [m], [s],
- $\alpha$  kut nagiba pokosa valoloma, [°],
- H<sub>t</sub> visina transmitiranog vala, [m],
- H<sub>i</sub> visina dolaznog vala, [m],

#### 2. Proračun refleksije od perforiranog valobrana:

Koriste se jednadžbe (16), (31)-(33), (40), (42), (44), (45):

$$K_{R} = \frac{\left[ \left( G^{2} + W^{2} \right)^{2} + W^{2} R^{2} \left( W^{2} R^{2} + 2G^{2} - 2W^{2} \right) \right]^{0,5}}{G^{2} + W^{2} (1+R)^{2}}$$
(130)

$$G = 1 - PW$$

$$P = lk$$
(131)

$$W = \tan(kB) \tag{132}$$

$$R = \beta \left(\frac{k}{\omega}\right) \tag{133}$$

$$l = 2C; \quad C = \frac{A2}{2} \left( \frac{A1}{a1} - 1 \right) + \frac{A1}{\pi} \left[ 1 - \log \left( \frac{4a1}{A1} \right) + \frac{1}{3} \frac{a1}{A1} + \frac{281}{180} \left( \frac{a1}{A1} \right)^4 \right]$$
(134)

$$\beta = \frac{8\alpha}{9\pi} H_t \,\omega \frac{W}{\sqrt{W^2 (R+1)^2 + G^2}} \frac{5 + \cosh(2kd)}{2kd + \sinh(2kd)} \tag{135}$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{pC_c} - 1\right)^2 \tag{136}$$

$$H_{tr} = K_R H_t \tag{137}$$

gdje su:

A1 karakteristična dimenzija stupa koja pripada jednom otvoru perforiranog zida [m],

A2 debljina stupa perforiranog zida, [m],

a1 karakteristična dimenzija otvora koja pripada jednom stupu perforiranog zida, [m],





 $C_{\rm C}$  kalibrirana vrijednost  $C_{\rm C}$ =0,8, u poglavlju 4.1.1.3 Kalibracija matematičkog modela pomoću rezultata fizikalnog modela,

- k valni broj k= $2\pi$ /L, [1/m],
- p poroznost perforiranog zida, [1],
- B širina komore perforirane konstrukcije, [m],
- H<sub>tr</sub> visina reflektiranog vala od perforiranog valobrana, [m],
- d dubina vode ispred konstrukcije, [m],
- ω kružna frekvencija, ω=2π/T [1/s].

3. Proračun superponirane valne visine između valoloma i valobrana (Slika 62)

$$H_{\sup} = H_t + H_{tr} \tag{138}$$

Novi matematički model za proračun hidrauličke funkcionalnosti, za **nepravilne valove** se sastoji od sustava slijedećih jednadžbi:

1. Proračun transmisije preko valoloma:

Koristi se jednadžba (116):

$$K_{T} = [-0.3F/H_{si} + 0.75[1 - exp(-0.5\xi_{op})]], \quad 0 > K_{T} > 1$$
(139)

$$S_{nt}(f) = K_T^2 S_{ni}(f)$$
(140)

gdje su:

F dubina vode na valolomu, [m],

 $H_{si}$  značajna visina vala ispred valoloma, [m], (preporuča se  $H_{si} = 4\sqrt{m_0}$ ),

 $\xi_{op}$  Irribarenov parametar,  $\xi_{op} = tg\alpha/(s_{op})^{0.5}$ ,  $s_{op} = 2\pi H_{si}/(gT_p^2)$ 

T<sub>p</sub> vršni period dolaznog vala, [s],

lpha kut nagiba pokosa valoloma, [°],

 $S_{\eta i}$  (f) funkcija spektralne gustoće energije dolaznih valova, [m<sup>2</sup>/s],

 $S_{\eta t}$  (f) funkcija spektralne gustoće energije transmitiranih valova, [m<sup>2</sup>/s],

m<sub>0</sub> nulti moment inercije dolaznog spektra  $S_{\eta i}(f)$ , [m<sup>2</sup>],

## 2. Deformacija valnog spektra pri prelasku preko valoloma

U proračun je potrebno uključiti deformaciju valnog spektra koja je opisana u poglavlju 2.4 Spektralna deformacija uslijed transmisije valova.

Proračunati reducirani valni spektar  $S_{\eta t}(f)$ , (jednadžba (140)), je potrebno deformirati prema postupku prikazanom na slici: Slika 55, [63]. Tako proračunati deformirani valni spektar,  $S_{\eta t}(f)$ , se koristi za daljnji proračun u točki 3 ovog poglavlja.

U proračunu deformacije korišteni su slijedeći parametri: donja frekvencijska granica: 1,5f<sub>p</sub>, gornja frekvencijska granica: 2,5f<sub>p</sub>, 85% energije raspodjeljeno u području <1,5f<sub>p</sub>, 15% energije u području između 1,5f<sub>p</sub> i 2,5f<sub>p</sub>. Ovi podaci su korišteni zbog bolje prilagođenosti mjerenim podacima. Do razlike dolazi zbog toga što je predloženi model, [63], formiran na osnovu valova većih valnih perioda u odnosu na uronjenost, F, pa je deformacija valnog spektra izraženija.

3. Proračun refleksije od perforiranog valobrana:

Koriste se jednadžbe (69)-(76):

Za svaku diskretnu n-tu komponentu valnog spektra ( $f_n$ ) provodi se proračun koeficijenta refleksije K<sub>Rn</sub> prema slijedećim jednadžbama:

$$K_{R_n} = \frac{\left[\left(G_n^2 + W_n^2\right)^2 + W_n^2 R_n^2 \left(W_n^2 R_n^2 + 2G_n^2 - 2W_n^2\right)\right]^{0.5}}{G_n^2 + W_n^2 (1 + R_n)^2}$$
(141)

$$G_n = 1 - P_n W_n \tag{142}$$

$$P_n = lk_n \tag{143}$$

$$W_n = \tan(k_n B) \tag{144}$$

$$R_n = \beta_n \left(\frac{k_n}{\omega_n}\right) \tag{145}$$

$$\beta = \frac{8\alpha}{9\pi} H_{rms} \omega_n \frac{W_n}{\sqrt{W_n^2 (R_n + 1)^2 + G_n^2}} \frac{5 + \cosh(2k_n d)}{2k_n d + \sinh(2k_n d)}$$
(146)

$$\alpha = \left(\frac{1}{pC_C} - 1\right)^2 \tag{147}$$

$$H_{rms} = \frac{4,004\sqrt{m_0}}{1,416} \tag{148}$$

m<sub>0</sub> površina ispod funkcije gustoće energije dolaznog valnog spektra  $S_{\eta t}(f)$ , [m<sup>2</sup>]

A1 karakteristična dimenzija stupa koja pripada jednom otvoru perforiranog zida [m],

A2 debljina stupa perforiranog zida, [m],

a1 karakteristična dimenzija otvora koja pripada jednom stupu perforiranog zida, [m],

 $C_{\rm C}$  kalibrirana vrijednost  $C_{\rm C}$ =0,7, u poglavlju 4.1.1.3 Kalibracija matematičkog modela pomoću rezultata fizikalnog modela,

 $k_n$  valni broj n-te komponente valnog spektra  $k_n=2\pi/L_n$ ,  $L_n=\frac{gT_n^2}{2\pi}\tanh(\frac{2\pi d}{L_n})$ ,

 $T_n = \frac{1}{f_n}$ , [1/m],

p poroznost perforiranog zida, [%],

- B širina komore perforirane konstrukcije, [m],
- d dubina vode ispred konstrukcije, [m],
- $ω_n$  kružna frekvencija,  $ω_n=2\pi/T_n$  [1/s].

Ako se diskretna razdioba koeficijenta refleksije  $K_{Rn}$  pretvori u kontinuiranu razdiobu  $K_{R}(f)$ , reflektirani spektar se potom određuje kao:

$$S_{\eta tr}(f) = K_R^{2}(f) S_{\eta t}(f)$$
(149)

4. Proračun superponirane valne visine između valoloma i valobrana (Slika 63), [72]:

$$H_{s-\sup} = 4 \cdot \sqrt{\int_{0}^{\infty} \left[ S_{\eta t}(f) + S_{\eta tr}(f) \right] df}$$
(150)

#### 4.1.3.2 Eksperimentalna istraživanja – fizikalni model

#### Valni prametri za eksperimentalna ispitivanja

U ispitivanju interakcije varirana je udaljenost valoloma od perforiranog valobrana L<sub>p</sub>, (Slika 62) i uronjenost valoloma F. Korištene su tri udaljenosti valoloma od valobrana L<sub>p</sub>=1,2m, 2,4m i 6,2m i dvije uronjenosti F=0,06m i 0,1m. Na taj način je dobiveno ukupno 6 kombinacija. Kombinacije nose nazive Inter1, Inter2, Inter3, Inter4, Inter5 i Inter6 i prikazane su na slikama: Slika 88 do Slika 93.

Valni parametri s kojima su vršena eksperimentalna ispitivanja za svaku pojedinu interakciju, (Inter1-Inter6), su definirani u tablicama: Tablica 4 za pravilne valove i Tablica 5 za nepravilne valove. Tako je načinjeno ukupno 54 ispitivanja za pravilne valove i isto toliko za nepravilne.



#### <u>Opis fizikalnog modela</u>

Slika 88 Uzdužni presjek valnog kanala sa smještajem modela perforiranog valobrana i valoloma za udaljenost valoloma od valobrana, L<sub>p</sub>=6,2m i uronjenost valoloma F=0,06m, (Inter1).



Slika 89 Uzdužni presjek valnog kanala sa smještajem modela perforiranog valobrana i valoloma za udaljenost valoloma od valobrana, L<sub>p</sub>=2,4m i uronjenost valoloma F=0,06m, (Inter2).



Slika 90 Uzdužni presjek valnog kanala sa smještajem modela perforiranog valobrana i valoloma za udaljenost valoloma od valobrana, L<sub>p</sub>=1,2m i uronjenost valoloma F=0,06m, (Inter3).







Slika 92 Uzdužni presjek valnog kanala sa smještajem modela perforiranog valobrana i valoloma za udaljenost valoloma od valobrana, L<sub>p</sub>=2,4m i uronjenost valoloma F=0,1m, (Inter5).





Model perforiranog valobrana je izrađen prema slici: Slika 75, a model valoloma prema slici: Slika 82.

Sondama G2-G4 je moguće izmjeriti dolazne valne visine prije valoloma,  $H_i$ . Sondama G5-G7 je moguće izmjeriti transmitirane valne visine iza valoloma,  $H_t$ , i reflektirane valne visine od perforirane konstrukcije,  $H_{tr}$ , (Slika 62), [55]. Na taj način, za pravilne, valove se može odrediti eksperimentalna superponirana valna visina,  $H_{sup}$ , između valoloma i perforiranog valobrana prema jednadžbi (124).

Kod nepravilnih valova se pomoću sondi G2-G4 može izmjeriti dolazni valni spektar S<sub> $\eta$ i</sub>(f). Pomoću sondi G5-G7 može se razdvojiti transmitirani S<sub> $\eta$ t</sub>(f) i reflektirani spektar S<sub> $\eta$ tr</sub>(f), (Slika 63). Na taj način se može odrediti eksperimentalna superponirana značajna valna visina, H<sub>s-sup</sub>, između valoloma i perforiranog valobrana prema jednadžbi (125).

# 4.1.3.3 Verifikacija novog matematičkog modela pomoću rezultata fizikalnog modela

Verifikacija novog matematičkog modela je provedena usporedbom  $H_{sup}$ , za pravilne valove i  $H_{s-sup}$  za nepravilne valove, dobivene eksperimentalno i pomoću jednadžbi (138), odnosno (150). Verifikacija je provedena sa ukupno 54 mjerenja za pravilne i isto toliko za nepravilne valove.



Slika 94 Verifikacija novog matematičkog modela za pravilne valove (poglavlje 4.1.3.1), pomoću rezultata fizikalnog modela (poglavlje 4.1.3.2).



Slika 95 Verifikacija novog matematičkog modela za nepravilne valove (poglavlje 4.1.3.1), pomoću rezultata fizikalnog modela (poglavlje 4.1.3.2).

Može se zaključiti da novi matematički modeli za pravilne i za nepravilne valove dobro opisuju rezultate mjerenja na fizikalnom modelu ta da se mogu koristiti u granicama valnih i geometrijskih parametara za koje su verificirani. Utjecaj deformacije valnog spektra je neznatan zbog upotrebne relativno kratkih valova u odnosu na uronjenost valoloma. Stoga samo skraćenje valnih duljina nije zamjetno i može se zanemariti.

Na donjim slikama su prikazani primjeri proračunatog i izmjerenog valnog spektra reflektiranog od perforiranog valobrana.





Primjer teorijskog i izmjerenog valnog spektra reflektiranog od perforiranog valobrana, Inter1.





Primjer teorijskog i izmjerenog valnog spektra reflektiranog od perforiranog valobrana, Inter2.





Primjer teorijskog i izmjerenog valnog spektra reflektiranog od perforiranog valobrana, Inter6.

Teorijski model dobro opisuje pojavu vršnog perioda i pojavu prvog višeg harmonika, te glavninu valne energije na prvom harmoniku. U svim gornjim primjerima uočava se skok funkcije spektralne gustoće na frekvenciji 2,8Hz, što se pripisuje greški mjerenja, odnosno broju i razmaku sondi za razdvajanje dolaznog od reflektiranog spektra, [55].

# 4.1.4 Ispitivanje utjecaja udaljenosti valoloma od perforiranog valobrana na fizikalnom modelu

Ova tema se otvara na kraju poglavlja o formiranju novog matematičkog modela iz razloga cjelovitosti prethodnih poglavlja. Naime, u novom matematičkom modelu formiranom i verificiranom u prethodnim poglavljima nije uključen utjecaj udaljenosti valoloma od valobrana, L<sub>p</sub>. Stoga će u nastavku biti prikazani rezultati ispitivanja udaljenosti, L<sub>p</sub>, na hidrauličku funkcionalnost.

Na donjoj slici, (Slika 100), prikazan je odnos superponirane valne visine,  $H_{sup}$ , (Slika 62), i perioda vala T za sve interakcije i valove iz tablice: Tablica 4. Prikazano je ukupno 54 ispitivanja.



Slika 100 Utjecaj udaljenosti valoloma od valobrana, L<sub>p</sub>, za pravilne valove.

Za svaki T, na gornjem, (F=0,06m) i donjem, (F=0,1m) dijagramu, postoje po tri ispitivanja sa istom valnom visinom, H, ali različitim L<sub>p</sub>. Što znači da je na jednoj vertikali, T, na kojoj su valovi istog, H, leže ispitivanja sa različitim L<sub>p</sub>. Ukoliko bi postojala nekakva zamjetna ovisnost H<sub>sup</sub> o L<sub>p</sub> to bi se trebalo očitovati u pravilnosti rasporeda podataka po različitim vertikalama na gornjim dijagramima. S obzirom da je ta ovisnost neizmjerivo malena zaključuje se da H<sub>sup</sub> ne ovisi o L<sub>p</sub> u granicama ispitivanja fizikalnim modelom i stoga L<sub>p</sub> nije uključen u matematički model za ispitivanje hidrauličke funkcionalnosti interakcije.



Slika 101 Utjecaj udaljenosti valoloma od valobrana, L<sub>p</sub>, za nepravilne valove.

Isti zaključak se može donijeti i za nepravilne valove.

# 4.2 Opis istraživanja za hidrauličko opterećenje

Istraživanje hidrauličke interakcije valoloma i perforiranog valobrana sa aspekta hidrauličkog opterećenja je vršeno uz pomoć matematičkih modela i fizikalnog modela. Na donjoj slici, (Slika 102), prikazan je postupak istraživanja koji obuhvaća istraživanje za perforirani valobran, za valolom i na kraju za interakciju perforiranog valobrana i valoloma. Odabir matematičkog modela, izrada eksperimentalnih istraživanja i kalibracija matematičkog modela za valolom su načinjeni u postupku izrade matematičkog modela za hidrauličku funkcionalnost. Istraživanje prema shemi na donjoj slici je načinjeno za pravilne valove i za nepravilne valove.



Slika 102 Shema istraživanja hidrauličkog opterećenja interakcije perforiranog valobrana i valoloma.

# 4.2.1 Perforirani valobran

#### <u>Ograničenja modela</u>

Utjecaj pojedinih parametara konstrukcije i valova na hidrauličko opterećenje perforiranog valobrana je prikazan u poglavlju 1.5.1.2 Hidrauličko opterećenje. Ograničenja koja su uvedena po pitanju parametara valova i konstrukcije su prikazana tablici: Tablica 3.

## 4.2.1.1 Odabir matematičkog modela za analizu hidrauličkog opterećenja

Matematički modeli koji se koriste za ispitivanje hidrauličkog opterećenja se dijele na analitičke i empirijske. Prikaz nekih analitičkih matematičkih modela je dan u poglavlju 1.5.1.2 Hidrauličko opterećenje, a empirijskih modela u poglavlju 1.5.2.2 Hidrauličko opterećenje.

U ovom radu je korišten analitički matematički model prikazan u poglavlju 1.5.1.2.1, za pravilne i nepravilne valove, Tabet-Aoul i Belorgey, 1998, [46].

Primjenom matematičkog modela na određenu perforiranu konstrukciju dobije se rezultat u obliku dijagrama tlakova na konstrukciju (na prednji i stražnji zid) koji se koristi za proračun hidrauličkog opterećenja prema poglavlju 3.1.2 Hidrauličko opterećenje.

Za proračun raspodjele maksimalnog opterećenja, (Slika 60), kod nepravilnih valova koristi se projektna valna visina  $H_D=H_{max}=1,8H_s$ , gdje je  $H_s$  deformirana značajna valna visina ispred zida, bez refleksije od zida. Za proračun opterećenja kod djelovanja pravilnih valova koristi se  $H_D=H$ , gdje je H deformirana valna visina ispred zida.

Verifikacija modela je načinjena sa širokim rasponom valnih parametara i parametara geometrije konstrukcije, sa pravilnim i nepravilnim valovima, te također mjerenim podacima na izvedenom lukobranu, [46] i [74].

## 4.2.1.2 Eksperimentalna istraživanja – fizikalni model

## Valni prametri za eksperimentalna ispitivanja

Valni parametri s kojima su vršena eksperimentalna ispitivanja valoloma su definirani u tablicama Tablica 4 za pravilne valove i Tablica 5 za nepravilne valove.

#### Opis fizikalnog modela

U mjerenjima hidrauličkog opterećenja perforiranog valobrana korišten je istovjetni model kao za ispitivanje hidrauličke funkcionalnosti valobrana (poglavlje 4.1.1.2 Eksperimentalna istraživanja – fizikalni model, (Slika 74).

Na model perforiranog valobrana su ugrađeni diferencijalni tlakomjeri RS216-6253:

- raspon mjerenja tlaka od 0 do 0,1psi,
- izlazni napon od 14,7 do 18,7mV,
- osjetljivost 16,7 mV/psi,
- frekvencija uzorkovanja 1 ms.

Na modelu je smješteno ukupno osam tlakomjera, (T1-T8), četiri su postavljena na prednji zid komore (perforirani), a četiri na stražnji (nepropusni).



Slika 103 Prikaz modela perforiranog valobrana sa rasporedom tlakmjera, (T1-T8), za ispitivanje hidrauličkog opterećenja.



Slika 104 Ugrađeni tlakomjeri na stup perforiranog zida, pogled sa stražnje strane.

Načinjeno je ukupno 18 ispitivanja prema tablicama: Tablica 4 i Tablica 5. Tlakomjerima je mjeren tlak svakih 60ms, te je na taj način dobivena vremenska serija tlaka za svaki tlakomjer (T1-T8). Potom je iz svakog vremenskog zapisa izdvojen maksimalni zabilježeni tlak koji je nadalje bio mjerodavan za valne parametre za koje je mjeren. Ista obrada je rađena za pravilne i za nepravilne valove.

#### 4.2.1.3 Kalibracija matematičkog modela pomoću rezultata fizikalnog modela

Kalibracija matematičkog modela definiranog u poglavlju 4.2.1.1 je načinjena tako da su korišteni tlakovi mjereni tlakomjerima, (T1-T8) i tlakovi proračunati pomoću matematičkog modela (poglavlje 1.5.1.2.1, [46]), za pravilne i nepravilne valove. Primjer izmjerenih maksimalnih tlakova je prikazan na donjoj slici, za situaciju perforiranog zida bez valoloma. Izmjereni tlakovi su uspoređeni sa vrijednostima matematičkog modela, (poglavlje 1.5.1.2.1).


Slika 105 Primjer tlakova dobivenih mjerenjem na perforiranom valobranu bez valoloma i tlakova dobivenih pomoću teorijskog modela, (poglavlje 1.5.1.2.1, [46]), za pravilne valove, H=0,1m i T=1,45s.



Slika 106 Usporedba mjerenih tlakova na tlakomjerima T1-T8 na perforiranom valobranu bez valoloma, i vrijednosti teorijskog modela, (poglavlje 1.5.1.2.1, [46]), za parametre pravilnih valova iz tablice: Tablica 4.



Slika 107 Usporedba mjerenih tlakova na tlakomjerima T1-T8 na perforiranom valobranu bez valoloma, i vrijednosti teorijskog modela, (poglavlje 1.5.1.2.1, [46]), za parametre nepravilnih valova iz tablice:Tablica 5.

Na gornje dvije slike se uočava da teorijski model za perforirani valobran, precjenjuje izmjerene maksimalne tlakove za pravilne i za nepravilne valove. Za pravilne valove teorijski model precjenjuje mjerenja za srednju vrijednost 18% (crveni pravac), a najviše za ~30%, ako se izuzmu pojedini "outlineri". Kod nepravilnih valova teorijski model još više precjenjuje mjerenja. Tako je srednja vrijednost kojom teorijski model precjenjuje mjerenja 36%, a najviše za ~60%.

Prema verifikaciji istog teorijskog modela, pomoću nepravilnih valova, u radu [10], dobiveno je da model precjenjuje mjerene rezultate i do 30% što je slično rezultatima za pravilne valove u ovom radu. Uzrok tome je što su autori teorijskog modela, [46], prilikom prilagodbe teorijske funkcije na svoje mjerene podatke, koristili određeni interval pouzdanosti (najčešće 90%, 95% ili 99%) s čime su dobili model na strani sigurnosti sa određenim postotkom pouzdanosti. Usijed toga i mjerenja u ovom radu su veća od rezultata teorijskog modela.

Za rezultate sa pravilnim valovima se može reći da je razina pouzdanosti u skladu sa verifikacijom iz rada [10], dok je kod nepravilnih valova ta razlika veća. Bez obzira na veće odstupanje matematičkog modela od mjerenja kod nepravilnih valova, nadalje će se načiniti kalibracija, isto kao i za pravilne, a zaključci analize će biti samo na kvalitativnoj razini.

Da bi se fizikalno korektno mogla vršiti verifikacija matematičkog modela za interakciju potrebno je koristiti podatke bez intervala pouzdanosti. Stoga će se izvršiti kalibracija modela posebno za pravilne i posebno za nepravilne valove. Metoda kalibracije se sastoji u definiranju korekcijskih pravaca (crveno na slikama: Slika 106 i Slika 107). Svi rezultati tlakova se korigiraju dobivenim jednadžbama pravaca prema slijedećem modelu:

Korekcija tlakova dobivenih jednadžbama (96) - (101), za pravilne valove:

$$p_{p_{1}_{korigirano}} = \frac{p_{p_{1}}}{1,1829}, \ p_{p_{3}_{korigirano}} = \frac{p_{p_{3}}}{1,1829}, \ p_{p_{4}_{korigirano}} = \frac{p_{p_{4}}}{1,1829}$$
 (151)

Proračun dijagrama tlaka za stražnji zid:

$$p_{r_{1}_{korigirano}} = \frac{p_{r_{1}}}{1,1829}, \ p_{r_{3}_{korigirano}} = \frac{p_{r_{3}}}{1,1829}, \ p_{r_{4}_{korigirano}} = \frac{p_{r_{4}}}{1,1829}$$
 (152)

Korekcija tlakova dobivenih jednadžbama (96) - (101), za nepravilne valove:

$$p_{p1\_korigirano} = \frac{p_{p1}}{1,360}, \ p_{p3\_korigirano} = \frac{p_{p3}}{1,360}, \ p_{p4\_korigirano} = \frac{p_{p4}}{1,360}$$
 (153)

Proračun dijagrama tlaka za stražnji zid:

$$p_{r1\_korigirano} = \frac{p_{r1}}{1,360}, \ p_{r3\_korigirano} = \frac{p_{r3}}{1,360}, \ p_{r4\_korigirano} = \frac{p_{r4}}{1,360}$$
 (154)

U prilog znatnom raspršenju podataka sa gornjih slika, (Slika 106 i Slika 107), ide pojava tzv. iščezavajućih valova i povremena onečišćenost vode koja se zbog tehnologije izrade eksperimenata nije mogla održavati čišćom.

U formiranju novog matematičkog modela za proračun hidrauličkog opterećenja interakcije valobrana i valoloma koristiti će se kalibrirani matematički model za pravilne i za nepravilne valove.

#### 4.2.2 Valolom

Istraživanje za hidrauličko opterećenje interakcije uključuje utjecaj valoloma na opterećenje perforiranog valobrana (poglavlje 3.3.2). Valolom svojim geometrijskim karakteristikama utječe na opterećenje perforiranog valobrana, odnosno ovisno o transmitiranoj valnoj visini preko valoloma, perforirani valobran će biti manje opterećen. Za formiranje novog matematičkog modela za ispitivanje interakcije valoloma i valobrana su potrebni modeli:

- opterećenja perforiranog valobrana koji je prikazan u prethodnom poglavlju (4.2.1Perforirani valobran) i
- model funkcionalnosti (transmisija) za valolom koji je za opterećenje isti kao i za funkcionalnost (poglavlje 4.1.2 Valolom.).

Stoga se ovdje odabir matematičkog modela, fizikalni model i kalibracija neće ponovno prikazivati, nego su oni dani u poglavlju 4.1.2 Valolom.

#### 4.2.3 Interakcija perforiranog valobrana i valoloma

#### <u>Ograničenja modela</u>

Ograničenja modela koja su uvedena po pitanju parametara valova i konstrukcije za perforirani valobran, (Tablica 3), i valolom, (Tablica 6), za ispitivanje hidrauličke funkcionalnosti su ista i za ispitivanje hidrauličkog opterećenja, s obzirom da je korišten isti fizikalni model.

#### 4.2.3.1 Odabir matematičkog modela za analizu hidrauličkog opterećenja

U postojećoj znanstvenoj literaturi ne postoje matematički modeli za ispitivanje interakcije perforiranog valobrana i valoloma za hidrauličko opterećenje. Postoje modeli za ispitivanje ove dvije konstrukcije zasebno. U ovom poglavlju će se koristiti:

analitički matematički model za hidrauličko opterećenje perforiranog valobrana (poglavlje 1.5.1.2.1, Metoda redukcije sile na konstrukciju)

empirijski matematički model za hidrauličku funkcionalnost valoloma (poglavlje 2.3.2 Valolomi sa glatkom oblogom), odnosno za proračun transmitiraninih valnih visina preko valoloma.

Za proračun hidrauličkog opterećenja valobrana u interakciji s valolomom koristiti će se postupak definiran u poglavlju 3.3.2 Hidrauličko opterećenje.

Na ovaj način, kombinacijom analitičkog i empirijskog matematičkog modela dobiva se hibridni matematički model, kojim se može ispitivati interakcija ove dvije građevine za različite valne parametre i parametre konstrukcije.

U matematičkom modelu nije uključen utjecaj udaljenosti valoloma od perforiranog valobrana, L<sub>p</sub>, pa će stoga na fizikalnom modelu biti ispitan utjecaj udaljenosti L<sub>p</sub> na hidrauličku funkcionalnost interakcije, i biti uključen u hibridni matematički model.

Pri prijelazu nepravilnih valova preko valoloma dolazi do loma valova pri čemu se iza valoloma mijenja distribucija valnih visina. To je bitno iz razloga što u tom slučaju više ne vrijedi pretpostavka da je  $H_D=H_{max}=1,8H_s$ , (poglavlje 4.2.1.1). Odnos maksimalne valne visine  $H_{max}$  i značajne  $H_s$  se mijenja i u ovom radu je proračunavan prema postupku danom u poglavlju 2.4.1.

Radi razumijevanja rada u nastavku će se ponoviti jednadžbe iz prethodnih poglavlja, a koje čine novoformirani matematički model.

Novi matematički model za proračun hidrauličke funkcionalnosti, **za pravilne valove** se sastoji od sustava slijedećih jednadžbi:

#### 1. Proračun transmisije preko valoloma:

Koristi se jednadžba (127):

$$K_{\rm T} = 1.5 \cdot [-0.3 \frac{\rm F}{\rm H_i} + 0.75 \, [1 - \exp(-0.5\xi)]] - 0.42$$
 (155)

$$H_t = K_T H_i \tag{156}$$

gdje su:

- F dubina vode na valolomu, [m],
- $\xi$  Irribarenov parametar,  $\xi = tg\alpha/(s)^{0.5}$ ,  $s = 2\pi H_i/(gT^2)$
- T period dolaznog vala, [m], [s],
- $\alpha$  kut nagiba pokosa valoloma, [°],
- Ht visina transmitiranog vala, [m],
- H<sub>i</sub> visina dolaznog vala, [m],

#### 2. Proračun opterećenja perforiranog valobrana:

Koriste se jednadžbe (90)-(101):

$$\eta^{*} = 0.75(1 + \cos\beta)\lambda_{i1}H_{D}$$

$$\alpha_{1} = 0.6 + 0.5 \left(\frac{\frac{4\pi d}{L}}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{L}\right)}\right)^{2}$$

$$\alpha_{2} = \min\left(\frac{\left(1 - \frac{h_{s}}{d_{b}}\right)\left(\frac{H_{D}}{h_{s}}\right)^{2}}{3}, \frac{2h_{s}}{H_{D}}\right)^{2}$$
(157)
(158)

$$\alpha_{3} = 1 - \left(\frac{h'}{d}\right) \left(1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)}\right)$$
(159)
$$\alpha_{c} = 1 - \frac{R_{c}^{*}}{R_{c}^{*}}$$

$$\begin{aligned} \alpha_4 &= 1 - \frac{1}{\eta^*} \\ R_c^* &= \min\left(R_c, \eta^*\right) \end{aligned} \tag{101}$$

$$\alpha^* = \max(\alpha_1, \alpha_2) \tag{162}$$

gdje su:

 $\begin{array}{ll} H_D & \mbox{valna visina ispred zida za proračun opterećenja vertikalnog zida, [m], H_D=H_t. \\ \lambda_{i1} & \mbox{multiplikacijski faktori, za perforirani zid $\lambda_{i1}=0,42$, a za stražnji zid $\lambda_{i1}=(0,7-B/L)^2$, } \end{array}$ 

L valna duljina ispred zida [m],

h<sub>s</sub> dubina vode od berme do vodnog lica [m]

- d<sub>b</sub> visina berme ispred konstrukcije, [m],
- d dubina vode ispred konstrukcije, [m],
- h' uronjena dubina konstrukcije, [m],

Proračun dijagrama tlaka za perforirani zid:

$$p_{p1} = 0.5(1 + \cos\beta)(0.42\alpha_1 + (B/2L)(1 + \alpha^*)\cos^2\beta)\rho_g H_D$$
(163)

$$p_{p3} = \alpha_3 p_{p1}$$
(164)

$$p_{p4} = \alpha_4 p_{p1}$$
(165)

Proračun dijagrama tlaka za stražnji zid:

$$p_{r1} = 0.5(1 + \cos\beta)((0.7 - B/L)^2\alpha_1 + (0.43 - B/L)(1 + \alpha^*)\cos^2\beta)\rho_g H_D$$
(166)

$$p_{r3} = \alpha_3 p_{r1}$$
(167)

$$p_{r4} = \alpha_4 p_{r1} \tag{168}$$

Novi matematički model za proračun hidrauličke funkcionalnosti, za nepravilne valove se sastoji od sustava slijedećih jednadžbi:

1. Proračun transmisije preko valoloma:

Koristi se jednadžba (116):

$$K_{T} = [-0.3F/H_{si} + 0.75[1 - exp(-0.5\xi_{op})]]$$
(169)

$$S_{nt}(f) = K_T^2 S_{ni}(f)$$
(170)

gdje su:

F dubina vode na valolomu, [m],

 $H_{si}$  značajna visina vala ispred valoloma, [m], (preporuča se  $H_{si} = 4\sqrt{m_0}$ ),

 $\xi_{op}$  Irribarenov parametar,  $\xi_{op} = tg\alpha/(s_{op})^{0.5}$ ,  $s_{op} = 2\pi H_{si}/(gT_p^2)$ 

T<sub>p</sub> vršni period dolaznog vala, [s],

 $\alpha$  kut nagiba pokosa valoloma, [°],

 $S_{\eta i}$  (f) funkcija spektralne gustoće energije dolaznih valova, [m<sup>2</sup>/s],

 $S_{\eta t}$  (f) funkcija spektralne gustoće energije transmitiranih valova, [m<sup>2</sup>/s],

m<sub>0</sub> nulti moment inercije dolaznog spektra  $S_{ni}(f)$ , [m<sup>2</sup>],

2. Proračun projektnih valnih visina, H<sub>D</sub>, za proračun opterećenja valobrana

Pri prelasku nepravilnih valova preko valoloma, odnos maksimalne valne visine  $H_{max}$  i značajne  $H_s$  se mijenja i u ovom radu je proračunavan prema postupku danom u poglavlju 2.4.1, [71].

Korištena je maksimalna valna visina  $H_{max} = H_{1\%}$ , zbog ograničenog broja valova u mjerenom valnom zapisu. Za lokalnu dubinu vode, h, je korištena uronjenost valoloma, F, kut nagiba dna,  $\theta$ =0.

3. Proračun opterećenja perforiranog valobrana:

Koriste se jednadžbe (90)-(101):

 $\eta^* = 0.75(1 + \cos\beta)\lambda_{i1}H_D$ 

$$\alpha_{1} = 0.6 + 0.5 \left( \frac{\frac{4\pi d}{L_{p}}}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{L_{p}}\right)} \right)^{2}$$

$$\alpha_{2} = \min\left( \frac{\left(1 - \frac{h_{s}}{d_{b}}\right) \left(\frac{H_{D}}{h_{s}}\right)^{2}}{3}, \frac{2h_{s}}{H_{D}}\right)^{2}$$

$$\alpha_{3} = 1 - \left(\frac{h'}{d} \left(1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L_{p}}\right)}\right)$$

$$(172)$$

$$\alpha_{3} = 1 - \left(\frac{R_{s}^{*}}{s}\right)$$

$$(173)$$

$$\alpha_4 = 1 - \frac{\kappa_c}{\eta^*} \tag{174}$$

$$R_c^* = \min(R_c, \eta^*) \tag{175}$$

$$\alpha^* = \max(\alpha_1, \alpha_2) \tag{176}$$

gdje su:

 $H_D$  valna visina ispred zida za proračun opterećenja vertikalnog zida, [m],  $H_D=H_t$ .

 $\lambda_{i1}$  multiplikacijski faktori, za perforirani zid $\lambda_{i1}$ =0,42, a za stražnji zid $\lambda_{i1}$ =(0,7-B/L)^2,

L<sub>p</sub> vršna valna duljina ispred zida [m],

 $h_s$  dubina vode od berme do vodnog lica [m]

 $d_b$  visina berme ispred konstrukcije, [m],

d dubina vode ispred konstrukcije, [m],

h' uronjena dubina konstrukcije, [m],

Proračun dijagrama tlaka za perforirani zid:

$$p_{p1} = 0.5(1 + \cos\beta)(0.42\alpha_1 + (B/2L)(1 + \alpha^*)\cos^2\beta)\rho_g H_D$$
(177)

$$p_{p3} = \alpha_3 p_{p1} \tag{178}$$

$$p_{p4} = \alpha_4 p_{p1} \tag{179}$$

Proračun dijagrama tlaka za stražnji zid:

$$p_{r1} = 0.5(1 + \cos\beta) ((0.7 - B/L)^2 \alpha_1 + (0.43 - B/L)(1 + \alpha^*) \cos^2\beta) \rho_g H_D$$
(180)

$$p_{r3} = \alpha_3 p_{r1} \tag{181}$$

$$p_{r4} = \alpha_4 p_{r1} \tag{182}$$

#### 4.2.3.2 Eksperimentalna istraživanja – fizikalni model

Eksperimentalno ispitivanje hidrauličke interakcije sa aspekta hidrauličkog opterećenja je vršeno u istim uvjetima kao i za funkcionalnost, odnosno na modelu za ispitivanje hidrauličke funkcionalnosti su istovremeno vršena mjerenja tlaka na perforiranom valobranu.

Fizikalni model je opisan u poglavlju 4.1.3.2 Eksperimentalna istraživanja – fizikalni model.

Raspored tlakomjera na modelu perforiranog valobrana je prikazan na slici: Slika 103.

Načinjeno je ukupno 54 ispitivanja prema tablici: Tablica 4, za Inter1, Inter2, Inter3, Inter4, Inter5 i Inter6 za pravilne valove i isto toliko prema tablici: Tablica 5, za nepravilne valove za iste interakcije. Tlakomjerima je mjeren tlak svakih 60ms, te je na taj način dobivena vremenska serija tlaka za svaki tlakomjer (T1-T8). Potom je iz svakog vremenskog zapisa izdvojen maksimalni zabilježeni tlak koji je nadalje bio mjerodavan za valne parametre za koje je mjeren. Ista obrada je rađena za pravilne i za nepravilne valove.

# 4.2.3.3 Verifikacija novog matematičkog modela pomoću rezultata fizikalnog modela

Verifikacija matematičkog modela definiranog u poglavlju 4.2.3.1 je načinjena tako da su uspoređivani tlakovi mjereni pojedinim tlakomjerima, (T1-T8) i tlakovi proračunati pomoću matematičkog modela, za pravilne i nepravilne valove.



Slika 108 Verifikacija novog matematičkog modela za pravilne valove (poglavlje4.2.3.1), pomoću rezultata fizikalnog modela (poglavlje4.2.3.2).



Matematički model za pravilne valove precjenjuje mjerenja u području malih tlakova. Općenito kod oba modela, (za pravilne i nepravilne valove), se može uočiti da dobro opisuju trend porasta mjerenih tlakova.

Može se uočiti relativno povećano raspršenje podataka oko pravca y=x. Razlog tome je u nedostatku ekperimentalnog pristupa. Naknadnim analizama video snimaka uočena su tri moguća razloga dotičnog raspršenja:

1. Pojava, tzv. iščezavajućih valova. Iščezavajući valovi nastaju prolaskom struje vode kroz perforacije zida i šire se koncentrično od perforacija zida. Odlikuju se malom energijom, odnosno malom valnom visinom i duljinom, stoga iščezavaju uslijed sila kapilarnosti. U matematičkim modelima se obično zanemaruju. Povećanjem mjerila modela, ovi valovi ne prate odnos geometrijske sličnosti.

Ovi valovi djeluju u zoni tlakomjera koji se nalaze blizu vodnog lica, (tlakomjeri T1, T2, T5 i T6, Slika 103). Ti površinski tlakomjeri obično mjere manje vrijednosti tlakova pa im iščezavajući valovi mogu znatno povećati vrijednost tlaka.

2. Utjecaj nečiste vode. S obzirom da su se mjerenja vršila u periodu od dva mjeseca, nerijetko se vršila izmjena vode u kanalu radi održavanja čistoće vode. U tim procesima je katkad voda ostajala duže u kanalu nego što je trebala. Kada je voda postajala nečista do određene mjere, dolazilo je do biološke razgradnje, što je rezultiralo pojavom produkata biološke razgradnje, karakteriziranim viskoznošću, povećanom gustoćom i ljepljivošću. Ti produkti su se pojavljivali kao nakupina debljine nekoliko centimetara, na dnu kanala. Radom generatora dolazilo je do mješanja vode i produkata razgradnje po čitavom vodnom stupcu, čime su produkti dospjeli i do tlakomjera na perforiranom zidu. Svojom povećanom viskoznošću su djelovali na osjetljive membrane tlakomjera i ometali ulazak vode kroz milimetarske otvore tlakomjera.

3. Pojava bočne refleksije. Kanal u kojem su vršena mjerenja je ograničene duljine (18m), drvenih fleksibilnih stranica i nesavršenih dimenzija. Uslijed svih ovih razloga dolazi do pojave tzv. bočne refleksije, koja se manifestira valovima koji putuju uzduž kanala reflektirajući se od bočnih stranica. Ova pojava je karakteristična za strme valove malih valnih duljina i izraženija je za pravilne valove kada ritmična gibanja pravilnih valova mogu izazvati rezonantni mehanizam u kanalu. Kod nepravilnih valova ovaj mehanizam je znatno onemogućen pojavom različitih valnih duljina i visina valova pa je bočna refleksija manje izražena.

# 4.2.4 Ispitivanje utjecaja udaljenosti valoloma od perforiranog valobrana na fizikalnom modelu

Ova tema se otvara na kraju poglavlja o formiranju novog matematičkog modela za ispitivanje hidrauličkog opterećenja zbog cjelovitosti prethodnih poglavlja. Naime, u novom matematičkom modelu formiranom i verificiranom u prethodnim poglavljima nije uključen utjecaj udaljenosti valoloma od valobrana, L<sub>p</sub>. Stoga će u nastavku biti prikazani rezultati ispitivanja udaljenosti, L<sub>p</sub>, na hidrauličko opterećenje perforiranog valobrana. Ispitivane su tri udaljenosti valoloma od valobrana L<sub>p</sub>=1,2m, 2,4m i 6,2m i dvije uronjenosti F=0,06m i 0,1m. Na taj način je dobiveno ukupno 6 kombinacija: Inter1, Inter2, Inter3, Inter4, Inter5 i Inter6 i prikazane su na slikama: Slika 88 do Slika 93.

Na donjoj slici, (Slika 110), prikazane su vrijednosti izmjerenih tlakova na perforiranom valobranu bez valololoma (apscisa) i pripadajuće vrijednosti izmjerenih tlakova na perforiranom valobranu sa valololomom (ordinata). Svakoj vrijednosti izmjerenog tlaka bez valoloma pripada šest vrijednosti tlakova izmjerenih za pojedine interakcije (INTER1, 2, 3, 4, 5 i 6).



Slika 110 Utjecaj udaljenosti valoloma od valobrana, L<sub>p</sub>, za pravilne valove.

Ovakav prikaz daje nam dvojaku informaciju o mjerenim podacima:

1. Većina vrijednosti izmjerenih za interakcije se nalaze ispod pravca y=x, što znači da su izmjereni tlakovi u interakcijama manji nego tlakovi bez valoloma. Takav

rezultat je bio za očekivati s obzirom da se disipira valna energija na valolomu i manji valovi iza valoloma uzrokuju manje tlakove na konstrukciju.

2. Za pojedine interakcije načinjena je prilagodba pravca na podatke s time da se ishodište zadržava u nuli. Pojedini pravac prikazuje prosječnu raspodjelu tlakova za pojedinu interakciju. Pravci za interakcije 1, 2 i 3 su smješteni niže nego pravci za interakcije 4, 5 i 6. Odnosno izmjereni tlakovi koji pripadaju Inter 1, 2 i 3 su manji nego tlakovi za Inter 4, 5 i 6. To je bilo za očekivati s obzirom da je uronjenost za Inter 1, 2 i 3 bila F=0,06m, a za Inter 4, 5 i 6, F=0,1m. U prvom slučaju propuštena energija preko valoloma je manja pa su i tlakovi manji.

Također je interesantno kako su međusobno razmješteni pravci za interakcije 1, 2 i 3. Vidimo da Inter 3 daje najviše izmjerene tlakove, pa onda idu Inter 2 i Inter 1. Prilikom izvođenja pokusa uočena je zona iza valoloma u kojoj volumen vala koji preljeva ima izraženu kinetičku energiju. Kada se perforirani valobran postavi u blizinu te zone (Inter 3,  $L_p$ =1,2m), tada se javljaju povećane sile na perforirani valobran. Veličina zone povećane kinetičke energije vala ovisi o veličini vala i uronjenosti F. Što je veća uronjenost, manji je intezitet loma vala i manja je zona povećane kinetičke energije iza valoloma. S obzirom da je za Inter 4, 5 i 6, uronjenost veća, tako je manje izražena razlika između pravaca za Inter 4, 5 i 6. Tom nesrazmjeru znatno doprinosi i povećano raspršenje podataka.



Slika 111 Utjecaj udaljenosti valoloma od valobrana, L<sub>p</sub>, za nepravilne valove.

Isti zaključci se mogu donijeti i za nepravilne valove.

### 5 Zaključak

U nastavku će biti definiran praktičan značaj rada po pitanju hidrauličkog opterećenja i hidrauličke funkcionalnosti. Za hidrauličko opterećenje će se dati samo kvantitativna ocijena, a za funkcionalnost će biti prikazani dijagrami za praktičnu uporabu i biti će prikazana ekonomska komparacija različitih tipova obalnih građevina.

#### Hidrauličko opterećenje

Primjenom valoloma sa perforiranim vaobranom se smanjuje opterećenje na perforirani valobran. U ovom radu je pokazano da smanjenje opterećenja iznosi od 30-40% za vjetrovalne uvjete zaštićenih akvatorija kakvi su karakteristični za hrvatsku obalu Jadranskog mora.

Smanjenje opterećenja ima utjecaj na stabilnost i na čvrstoću perforiranog valobrana. Smanjenje opterećenja ima značajan utjecaj na stabilnost lukobrana, koji nemaju zemljani nasip sa stražnje strane i čija je stabilnost narušena olakšanjem konstrukcije zbog komore. Utjecaj na čvrstoću je manje značajan s obzirom da se radi o uštedama na armaturi i betonu stupova perforirane komore.

Mjereni rezultati opterećenja perforiranog valobrana pokazuju određeno raspršenje, a pogotovo za nepravilne valove. Pretpostavka je da je povećano raspršenje uzrokovano uslijed dva glavna razloga: pojavom tzv. iščezavajućih valova koji nastaju prolaskom struje vode kroz perforacije, a manifestiraju se kao superponirani viši harmonici i zbog povremene onečišćenosti vode koja se zbog tehnologije izrade eksperimenata nije mogla održavati čišćom. Potrebna su daljnja ispitivanja utjecaja valoloma na opterećenje perforiranog valobrana.

#### Hidraulička funkcionalnost

Nadalje će se predstaviti analiza različitih varijanti obalne zaštite primjenom novoformiranog matematičkog modela za interakciju valoloma i perforiranog valobrana, za hidrauličku funkcionalnost.

#### <u>Pravilni valovi</u>

Na slici (Slika 112) prikazani su rezultati proračuna superponiranih valnih visina  $H_{sup}$ , (Slika 62), za monokromatske valove, za:

- djelovanje samo vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, (Slika 116),
- interakciju valoloma i vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, (Slika 117),
- interakciju valoloma i perforiranog valobrana, (Slika 118).

Superponirane valne visine,  $H_{sup}$ , za djelovanje samo vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, su računate kao superpozicija dolazne i reflektirane valne visine sa koeficijentom refleksije  $K_R$ =1.

Za proračun, H<sub>sup</sub>, za interakciju valoloma i klasičnog gravitacijskog vertikalnog valobrana je upotrijebljen matematički model uz pretpostavku superpozicije dolazne valne visine (transmitirane preko valoloma) i potpuno reflektirane valne visine od vertikalnog gravitacijskog valobrana.

Proračun  $H_{sup}$  za interakciju valoloma i perforiranog valobrana je načinjen prema novoformiranom matematičkom modelu (poglavlje 4.1.3.1), za monokromatske valove.

Na slici (Slika 112) su vrijednosti, H<sub>sup</sub>/H<sub>i</sub>, stavljene u odnos sa relativnom uronjenošću valoloma F/H<sub>i</sub>. Takovim prikazom moguće je analizirati koliki je utjecaj pojedinih tipova građevina na H<sub>sup</sub>, ("Valolom+PuniValob", "Valolom+PerfValob" i "Puni Valob").

Crnom isprekidanom linijom je prikazana  $H_{sup}$  za djelovanje samo punog zida i u tom slučaju se sva valna energija reflektira te je superponirana valna visina jednaka dvostrukoj dolaznoj valnoj visini što se vidi iz odnosa  $H_{sup}/H_i=2$ . Vrijednost  $H_{sup}/H_i=2$  je neovisna o odnosu F/H<sub>i</sub> i konstantna za sve vrijednosti F/H<sub>i</sub>.

Linije (plavo, zeleno i crveno) su vrijednosti H<sub>sup</sub>/H<sub>i</sub> za različite strmosti valova H<sub>i</sub>/L=1/12, 1/17 i 1/25. Deblje isprekidane linije predstavljaju H<sub>sup</sub>/H<sub>i</sub>, za interakciju "Valolom+PuniValob" i prikazuju koliko valne energije disipira valolom u odnosu na na situaciju bez valoloma, ("PuniValob"). Beblje pune linije koje predstavljaju interakciju "Valolom+PerfValob" su još niže pozicionirane i predstavljaju udio energije koju dodatno disipira komora perforiranog valobrana.

Linije "Valolom+PuniValob" imaju lom kada dosegnu vrijednost  $H_{sup}/H_i = 2$ . U toj točki valolom propušta cjelokupnu dolaznu valnu energiju preko valoloma i za sve veće vrijednosti F/H<sub>i</sub> se sustav "Valolom+PuniValob" ponaša kao "Puni Valob". Taj isti lom se pojavljuje i kod linija "Valolom+PerfValob" s obzirom da se u tom slučaju  $H_{sup}$  računa kao  $H_{sup}(F/H_i) = K_T(F/H_i) \cdot H_i + K_R(F/H_i) \cdot K_T(F/H_i) \cdot H_i$ , gdje je  $K_T(F/H_i)$  funkcija transmisije preko valoloma koja ima lom, (jednadžba (128)).  $K_R(F/H_i)$  je funkcija refleksije od valobrana. Inače  $H_{sup}=f(H_i, L, F, d, A_1, A_2, a_1, B, \alpha)$ ; (definicije oznaka su u popisu oznaka). Na Slici 111 se koristi funkcionalna ovisnost  $H_{sup}/H_i=f(F/H_i)$ , jer se time dobiva kvalitetan prikaz fizikanih procesa, pogodan za analizu.

Deblje pune linije su krivulje, što je uzrokovano ovisnošću koeficijenta refleksije, K<sub>R</sub>, perforiranog valobrana o valnoj duljini, L. Funkcije koeficijenta refleksije K<sub>R</sub> =f(B/H<sub>i</sub>), su prikazane na priloženom grafikonu Slike 111. Jasno su uočljivi minimumi funkcije H<sub>sup</sub>/H<sub>i</sub> koji odgovaraju minimumima funkcije K<sub>R</sub> =f(B/H<sub>i</sub>). Vrijednosti valnih visina, H<sub>i</sub>, su vezane sa valnom duljinom, L, odnosom strmosti vala H<sub>i</sub>/L, (1/12, 1/17 i 1/25). Zapravo koeficijent refleksije K<sub>R</sub> ovisi o valnoj duljini L.

Također se može uočiti da se deblje krivulje asimptotski približavaju debljim isprekidanim pravcima, što odgovara približavanju funkcije  $K_R = f(B/H_i)$ , vrijednosti 1. Kada je  $K_R=1$ , konstrukcija "Valolom+PerfValob" daje iste vrijednosti  $H_{sup}$  kao i "Valolom+PuniValob".

Tankim točkastim linijma (plavo, zeleno i crveno) su prikazane vrijednosti  $H_{sup}/H_i$  za vrijednosti  $H_{i1.1} = 1.1 \cdot H_i$  i  $H_{i0.9} = 0.9 \cdot H_i$ , s tim da je valna duljina ostala ista. Na taj način je dobivena osjetljivost modela na promjenu dolaznih valnih parametara. Kružićima su prikazane vrijednosti dobivene eksperimentalno, koje su većinom smještene između linija  $(H_{sup}/H_i)_{1.1}=f(1.1\cdot H_i)$  i  $(H_{sup}/H_i)_{0.9}=f(0.9\cdot H_i)$ . Nužnost ovakvog prikaza je u tome što eksperimentalni dolazni valni parametri u valnom kanalu variraju oko zadane vrijednosti i uslijed toga dolazi do dodatnog neslaganja sa kontinuiranom krivuljom  $H_{sup}/H_i$ .



Slika 112 Usporedba valnih visina H<sub>sup</sub>/H<sub>i</sub>, za djelovanje vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, (Slika 116), za interakciju valoloma i vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, (Slika 117) i za interakciju valoloma i perforiranog valobrana, (Slika 118); F-uronjenost valoloma, (F=0,06m), širina komore B=0,18m, monokromatski valovi, " O" – mjerenja, " ....." – (H<sub>sup</sub>/H<sub>i</sub>)<sub>1.1</sub> i (H<sub>sup</sub>/H<sub>i</sub>)<sub>0.9</sub>.



Slika 113 Usporedba valnih visina H<sub>sup</sub>/H<sub>i</sub>, za djelovanje vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, (Slika 116), za interakciju valoloma i vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, (Slika 117) i za interakciju valoloma i perforiranog valobrana, (Slika 118), F-uronjenost valoloma, (F=0,1m), širina komore B=0,18m, monokromatski valovi, " O" – mjerenja, " ....." – (H<sub>sup</sub>/H<sub>i</sub>)<sub>1.1</sub> i (H<sub>sup</sub>/H<sub>i</sub>)<sub>0.9</sub>.

Na Slici 112 je dan isti prikaz kao i na Slici 111, osim što je korištena vrijednost F=0,1m. Ono što je karakteristično za ovaj prikaz, a nije istaknuto u prikazu na Slici 111, su linije  $(H_{sup}/H_i)_{1.1}$  i  $(H_{sup}/H_i)_{0.9}$  u području gdje valolom više nema utjecaja na dolazne valove i propušta svu valnu energiju na perforirani valobran, (područje desno od loma linija "Valolom+PuniValob"). U tom području linije  $(H_{sup}/H_i)_{1.1}$  i  $(H_{sup}/H_i)_{0.9}$  se približavaju debljim punim linijama, što znači da je refleksija od perforiranog valobrana manje osjetljiva na promjenu dolaznih valnih parametara nego što je to valolom.

Ako promatramo npr. samo plave točkaste linije, tada su  $(H_{sup}/H_i)_{1.1}$  donje točkaste linije, a  $(H_{sup}/H_i)_{0.9}$  su gornje, drugim riječima, donje linije pripadaju strmijim, a gornje blažim valovima, od onih koje predstavljaju deblje pune linije. Može se zaključiti da se

strmiji valovi bolje disipiraju, i na valolomu i na perforiranom valobranu, nego blaži valovi, što je očevidno i iz pozicija crvenih, zelenih i plavih linija za "Valolom+PerfValob". Utjecaj strmosti na disipaciju je izraženiji kod valoloma, nego kod perforiranog valobrana, što se manifestira većom udaljenosšću linija  $(H_{sup}/H_i)_{1.1}$  i  $(H_{sup}/H_i)_{0.9}$  od debljih punih linija.

Iz prikaza na slikama: Slika 112 i Slika 113, može se zaključiti koliki je doprinos valoloma na smanjenje valne energije, a koliki doprinos disipacijske komore perforiranog valobrana. Očevidna je promjenjivost doprinosa disipacijske komore, ovisno o dolaznim valnim parametrima, odnosno o dolaznoj valnoj duljini. Isto tako se može uočiti smanjenje doprinosa valoloma s povećanjem uronjenosti F.

Pri dimenzioniranju građevina koje uključuju interakciju, potrebno je pažljivo odabirati geometrijske parametre konstrukcije valoloma i perforiranog valobrana tako da dobijemo kao rezultat najmanje vrijednosti  $H_{sup}$ , za određene projektne valne parametre. Pri projektiranju težimo da nam F bude što manji jer time propuštamo manju valnu energiju u područje između valoloma i perforiranog zida. Utjecaj disipacijske komore reguliramo odabirom širine komore B u odnosu na valnu duljinu dolaznih valova L, tako da nam omjer bude B/L=~0.2, (poglavlje 1.3.3).

#### Nepravilni valovi

Na slici (Slika 114) prikazan je proračun superponiranih značajnih valnih visina  $H_{s-sup}$ , (Slika 63), za nepravilne valove, za situacije na slika: (Slika 116), (Slika 117) i (Slika 118).

Superponirane valne visine,  $H_{s-sup}$ , za djelovanje samo vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, su računate kao superpozicija dolazne valne energije i reflektirane od punog zida sa koeficijentom refleksije  $K_R$ =1.

Za proračun, H<sub>s-sup</sub>, za interakciju valoloma i klasičnog gravitacijskog vertikalnog valobrana je upotrijebljen matematički model uz pretpostavku superpozicije dolazne valne energije (transmitirane preko valoloma) i potpuno reflektirane valne energije od vertikalnog gravitacijskog valobrana.

Proračun  $H_{s-sup}$  za interakciju valoloma i perforiranog valobrana je načinjen prema novoformiranom matematičkom modelu (poglavlje 4.1.3.1), za nepravilne valove.

Prikaz na slici (Slika 114), za nepravilne valove, je istovjetan onome na slici (Slika 112), za pravilne.

Crnom isprekidanom linijom je prikazana  $H_{s-sup}$  za djelovanje samo punog zida i u tom slučaju se sva valna energija reflektira. Superponiranjem dolazne i reflektirane valne energije dobije se odnos  $H_{sup}/H_i=1,41$ , [72].

Način djelovanja pojedinih građevina je sličan kao i kod monokromatskih valova. Linije "Valolom+PuniValob" su pravci koji imaju lom kada dosegnu vrijednost H<sub>sup</sub>/H<sub>i</sub> =1.41.

Linije "Valolom+PerfValob" su zakrivljene, što je uzrokovano ovisnošću koeficijenta refleksije,  $K_R$ , perforiranog valobrana o valnoj duljini, L. Vrijednosti srednjeg koeficijenta refleksije  $K_R = f(B/H_{si})$ , su prikazane na priloženom grafikonu, Slika 114.

Kod nepravilnih valova utjecaj perforiranog valobrana na disipiranje valne energije je manji nego kod monokromatskih valova. Može se uočiti manje smanjenje valnih visina, za nepravilne valove, kod linija "Valolom+PerfValob" u odnosu na linije "Valolom+PuniValob". Razlog tome je što se refleksija od valoloma računa u spektralnoj domeni, odnosno, iz jednog spektra različite frekvencije se reflektiraju sa različitim koeficijentima refleksije. Uslijed toga, one frekvencije koje se reflektiraju sa većim koeficijentom refleksije poništavaju učinak onih frekvencija sa manjim koeficijentom refleksije. Na priloženim grafikonima koeficijenata refleksije za pravilne i nepravilne valove se može vidjeti da su općenito koeficijenti refleksije za pravilne valove manji nego za nepravilne valove. Tome je razlog gore navedeni efekt utjecaja različitih frekvencija iz spektra.



Slika 114 Usporedba valnih visina H<sub>s-sup</sub> /H<sub>i</sub>, za djelovanje vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, (Slika 116), za interakciju valoloma i vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, (Slika 117) i za interakciju valoloma i perforiranog valobrana, (Slika 118), F-uronjenost valoloma, (F=0,06m), širina komore B=0,18m, monokromatski valovi, " O" – mjerenja, " ....." – (H<sub>sup</sub>/H<sub>i</sub>)<sub>1.1</sub> i (H<sub>sup</sub>/H<sub>i</sub>)<sub>0.9</sub>.

Na gornjoj i donjoj slici su prikazana ekperimentalna mjerenja i linije  $(H_{sup}/H_i)_{1.1}=f(1.1\cdot H_i)$  i  $(H_{sup}/H_i)_{0.9}=f(0.9\cdot H_i)$ , kao i kod pravilnih valova. Uočava se da matematički model općenito precjenjuje mjerene vrijednosti osim u pojedinim slučajevma. S druge strane, također se može uočiti da je za raspon strmosti živog mora koji je ovdje korišten, (1/12-1/25), vrlo usko područje u kojem se javljaju vrijednosti  $H_{s-sup}$  / $H_i$ , odnosno  $H_{s-sup}$ . Drugim riječima mjerenja su u bliskoj zoni vrijednosti  $H_{s-sup}$  / $H_i$  matematičkog modela i samim time potvrđuju matematički model. Osim toga može se uočiti da su mjerenja grupirana prema strmosti, tako da najveće vrijednosti  $H_{s-sup}$  / $H_i$  imaju najblaži valovi (1/25), zatim manje vrijednosti imaju strmosti 1/17 i najmanje 1/12, što je isto slučaj i kod matematičkog modela.

Na donjoj slici jedan dio mjerenja pada u područje gdje valolom više nema utjecaja na dolazne valove i propušta svu valnu energiju na perforirani valobran, (područje desno od loma linija "Valolom+PuniValob"). U tom području, isto kao i kod pravilnih valova se linije  $(H_{sup}/H_i)_{1.1}$  i  $(H_{sup}/H_i)_{0.9}$  približavaju pripadnim linijama "Valolom+PerfValob". U tom području vrijede slični zaključci kao i kod pravilnih valova, da je osjetljivost perforiranog valobrana manja na promjenu dolaznih valnih parametara nego osjetljivost valoloma.



Slika 115 Usporedba valnih visina H<sub>s-sup</sub> /H<sub>i</sub>, za djelovanje vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, (Slika 116), za interakciju valoloma i vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, (Slika 117) i za interakciju valoloma i perforiranog valobrana, (Slika 118), F-uronjenost valoloma, (F=0,1m), širina komore B=0,18m, monokromatski valovi, " O" – mjerenja, " ....." – (H<sub>sup</sub>/H<sub>i</sub>)<sub>1.1</sub> i (H<sub>sup</sub>/H<sub>i</sub>)<sub>0.9</sub>.

Općenito se donosi zaključak da prikazani matematički modeli za pavilne i nepravilne valove dobro opisuju fiziku procesa interakcije valoloma i perforiranog valobrana, te mogu biti dobar alat pri projektiranju dotičnih građevina.

#### Ekonomska komparacija

Da bi se dobila potpuna informacija o mogućnostima upotrebe pojedinih kombinacija definiranih građevina u nastavku će se dati ekonomska komparacija za hipotetske projektne uvjete. Ekonomska komparacija će biti načinjena za dva tipa obala:

- 1. pristanišnu obalu i
- 2. urbanu obalu.

Kod pristanišne obale se pretpostavlja veća dubina mora, (7m), zbog potrebe pristajanja brodova, dok je kod urbane obale dubina mora 3m.

#### 1. Pristanišna obala

Pretpostavljaju se batimetrijski uvjeti kao na slikama: (Slika 116), (Slika 117) i (Slika 118), s time da su uvjeti temeljenja na čvrstoj hridi u kojoj je vršen iskop u određenoj mjeri.

Dolazna valna visina je  $H_{si}$ = 3m, a strmost vala je  $H_s/L_s$ =1/10. Projektni zadatak je onemogućiti preljevanje obalne konstrukcije u potpunosti, rezerva na visinu konstrukcije je 0,6m. Dobivena konstrukcijska rješenja prikazana su na slikama: (Slika 116), (Slika 117) i (Slika 118).



## Slika 116 Prikaz vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, u funkciji pristanišne obale.



Slika 117 Prikaz interakcije valoloma i vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, u funkciji pristanišne obale.



Slika 118 Prikaz interakcije valoloma i perforiranog valobrana, u funkciji pristanišne obale.

Načinjen je proračun troškova gradnje svake od pojedinih konstrukcija na gornjim slikama. Dobivene cijene vrijede za 1m' konstrukcije.

TIP KONSTRUKCIJE	JEDINIČNA	VISINA OBALE	AGITACIJA
	CIJENA	iznad MR-a	$BAZENA\;H_{s}$
	[kn/m']	[m]	[m]
Valolom + PerfValob	293.000 kn	3,0	1,7
Valolom + PuniValob	288.000 kn	3,6	2,2
PuniValob	306.000 kn	6,6	3,0

Tablica 7Komparacija troškova izgradnje, visine obale i agitacije bazena za<br/>različite varijante obalnih konstrukcija sa slika (Slika 116), (Slika 117) i<br/>(Slika 118).

Načelno gledajući, cijene za sve tri konstrukcije su približno jednake. Pitanje je koje su prednosti pojedinih tipova konstrukcije. Tu dolazi do izražaja primjena kombinacije valoloma i perforiranog valobrana. Ono što se dobiva primjenom konstrukcije "Valolom+PerfValob" je najniža kruna u odnosu na ostale dvije varijante, (Slika 117). Također značajne valne visine u akvatoriju su za ~25% manje za varijantu "Valolom+PerfValob" u odnosu na varijantu "Valolom+PerfValob" u odnosu na varijantu "Valolom+PuniValob", a za 45% manje u odnosu na varijantu "PuniValob". Također je manja erozija nožice temeljnog nasipa uslijed pojave manjih valnih visina na zidu, a samim time i manjih brzina vode pri dnu.

#### 2. Urbana obala

Pretpostavljaju se batimetrijski uvjeti kao na slikama: (Slika 119), (Slika 120) i (Slika 121), s time da su uvjeti temeljenja na čvrstoj hridi u kojoj je vršen iskop u određenoj mjeri.

Dolazna valna visina je  $H_{si}$ = 1,5m, a strmost vala je  $H_s/L_s$ =1/10. Projektni zadatak je onemogućiti preljevanje obalne konstrukcije u potpunosti, a rezerva na visinu konstrukcije je 0,4m. Dobivena konstrukcijska rješenja prikazana su na slikama: (Slika 119), (Slika 120) i (Slika 121).



Slika 119 Prikaz vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, u funkciji urbane obale.



Slika 120 Prikaz interakcije valoloma i vertikalnog gravitacijskog punog valobrana, u funkciji urbane obale.



Slika 121 Prikaz interakcije valoloma i perforiranog valobrana, u funkciji urbane obale.

Načinjen je proračun troškova gradnje svake od pojedinih konstrukcija na gornjim slikama. Dobivene cijene vrijede za 1m' konstrukcije.

	JEDINIČNA	VISINA	AGITACIJA
TIP KONSTRUKCIJE	CIJENA	OBALE iznad	BAZENA H <sub>s</sub>
	[kn/m']	MR-a [m]	[m]
Valolom + PerfValob	109.000 kn	1,9	1,0
Valolom + PuniValob	109.000 kn	2,3	1,3
PuniValob	111.000 kn	3,4	2,1

Tablica 8Komparacija troškova izgradnje, visine obale i agitacije bazena za<br/>različite varijante obalnih konstrukcija sa slika (Slika 119), (Slika 120) i<br/>(Slika 121).

I za urbane obale su cijene za sve tri konstrukcije približno jednake. Kod konstrukcije "Valolom+PerfValob" je najniža kruna obale, (Slika 121). Također značajne valne visine u akvatoriju su za ~25% manje odnosu na varijantu "Valolom+PuniValob", a za ~50% manje u odnosu na varijantu "PuniValob".

Primjena obalne konstrukcije koja sadrži valolom i perforirani valobran ima svoje prednosti u odnosu na ostale tipove obalnih konstrukcija, koje se očituju u manjoj visini obalne konstrukcije, manjoj eroziji nožice temeljnog nasipa i manjim valnim visinama u akvatoriju ispred obale. Svaka projektantska situacija u kojoj je bitno smanjenje neke od ovih veličina, za umjeren iznos, može kao jednu mogućnost koristiti interakciju valoloma i perforiranog valobrana.

#### Područje primjene valoloma i perforiranog valobrana

Kod pristanišnih obala primjenom kombinacije valoloma i perforiranog valobrana se dobiva veći broj prekrcajnih dana.

Kod urbanih obala gdje su značajni manja agitacija i niža visina obale kombinacija valoloma i perforiranog valobrana ima financijski nemjerljive efekte.

Popis oznaka:

- a ukupna površina otvora na zidu, [m<sup>2</sup>],
- A ukupna površina zida [m<sup>2</sup>].
- a1 karakteristična dimenzija otvora koja pripada jednom stupu perforiranog zida, [m],
- A1 karakteristična dimenzija stupa koja pripada jednom otvoru perforiranog zida,
- [m],
- A2 debljina stupa perforiranog zida, [m],
- B, B<sub>W</sub> širina komore perforiranog valobrana, [m],
- B<sub>b</sub> širina berme ispred konstrukcije, [m],
- B<sub>v</sub> širina krune valoloma, [m],
- d dubina vode ispred konstrukcije, [m],
- d' dubina vode u komori konstrukcije, [m],
- d<sub>b</sub> visina berme ispred konstrukcije, [m],
- D<sub>n50</sub> veličina srednjeg zrna obloge valoloma, [m],
- F dubina vode iznad krune valoloma, [m],
- F<sub>h</sub> trenutna horizontalna sila na konstrukciju, [N],
- f<sub>max</sub> maksimalna frekvencija, [Hz],
- f<sub>min</sub> minimalna frekvencija na kojoj se pojavljuje prvi minimum, [Hz],
- F<sub>p</sub> horizontalna sila na perforirani zid, [N],
- f<sub>p</sub> vršna frekvencija, [Hz],
- Fr horizontalna sila na stražnji zid, [N],
- fr redukcijski faktor koeficijenta refleksije valoloma,
- F<sub>uk</sub> ukupna horizontalna sila na perforiranu konstrukciju, [N],
- h lokalna dubina vode, [m],
- H<sub>b</sub> visina vala pri lomu, [m],
- H<sub>D</sub> valna visina ispred zida za proračun vertikalnog zida, [m],
- H<sub>DP</sub> valna visina ispred zida za proračun opterećenja perforiranog zida, [m],
- H<sub>i</sub> visina dolaznog vala, [m],
- H<sub>r</sub> visina reflektiranog vala, [m],
- H<sub>rms</sub> srednja kvadratna valna visina, [m],
- $h_s$  dubina vode od berme do vodnog lica, [m],
- H<sub>s</sub> značajna valna visina, [m],
- H<sub>si</sub> dolazna značajna valna visina, [m],
- H<sub>sr</sub> reflektirana značajna valna visina, [m],
- H<sub>st</sub> transmitirana značajna valna visina, [m],
- H<sub>sup</sub> superponirana valna visina, [m],
- H<sub>s-sup</sub> superponirana značajna valna visina, [m],
- H<sub>t</sub> transmitirana valna visina, [m],

- k valni broj k= $2\pi/L$ , [1/m],
- K<sub>A</sub> redukcijski koeficijet-odnos amplitude parcijalnog stojnog vala i potpunog stojnog vala,
- K<sub>A</sub> koeficijent atenuacije valne visine,
- K<sub>R</sub> koeficijent refleksije,
- K<sub>rH</sub> koeficijent redukcije valne visine za Godinu metodu,
- K<sub>T</sub> koeficijent transmisije,
- K<sub>Tu</sub> granična vrijednost koeficijenta transmisije za široke krune valoloma,
- $\overline{K_R}$ ,  $K_R$  srednji koeficijent refleksije prema jednadžbi (3),
- $\overline{K_R}^{pond}$  srednji ponderirani koeficijent refleksije,
- L valna duljina, [m],
- L<sub>C</sub> valna duljina u komori perforirane konstrukcije, [m],
- L<sub>CS</sub> značajna valna duljina u komori perforirane konstrukcije, [m],
- L<sub>op</sub> vršna valna duljina, pučinska, [m],
- L<sub>p</sub> vršna valna duljina dolaznog vala, [m],
- L<sub>S</sub> značajna valna duljina, [m],
- L<sub>pl</sub> udaljenost valoloma od perforiranog valobrana, [m],
- m<sub>0</sub> površina ispod funkcije gustoće energije dolaznog valnog spektra, [m<sup>2</sup>],
- p poroznost perforiranog zida [%],
- P propusnost tijela valoloma,
- P<sub>1/10</sub> desetinski tlak-srednjak desetine najviše zabilježenih tlakova, [N/m<sup>2</sup>],
- R<sub>c</sub> visina konstrukcije iznad vodnog lica, [m],
- $S\eta$ (f) funkcija spektralne gustoće energije valova, [m<sup>2</sup>/s],
- $S\gamma_i$  (f) funkcija spektralne gustoće energije dolaznih valova, [m<sup>2</sup>/s],
- $S\gamma_r$  (f) funkcija spektralne gustoće energije reflektiranih valova, [m<sup>2</sup>/s],
- $S\eta_t$  (f) funkcija spektralne gustoće energije transmitiranih valova, [m<sup>2</sup>/s],

 $S\gamma_{tr}$  (f) funkcija spektralne gustoće energije valova transmitiranih preko valoloma i reflektiranih od valobrana, [m<sup>2</sup>/s],

S<sub>op</sub> strmost vala,

- T period pravilnog vala, [s],
- T<sub>p</sub> vršni period, [s],
- $\alpha$  koeficijent lokalnog gubitka energije,
- ω kružna frekvencija, ω=2π/T, [1/s],
- $\eta_i$  izdizanje fizičke površine mora dolaznog vala, [m],
- $\eta_r$  izdizanje fizičke površine mora reflektiranog vala, [m],
- $\eta$  izdizanje fizičke površine mora, [m],
- $\alpha$  kut nagiba pokosa valoloma, [°],
- $\beta$  linearizirani koeficijent disipacije, [1],

- $\beta_i$  kut nailaska dolaznih valova, ( $\beta$ =0, okomiti kut nailaska na obalnu liniju), [°],
- $\beta_t$  kut gibanja transmitiranih valova, [°],
- $\theta$  kut nailaska valova na konstrukciju, [°],
- ξ Irribarenov parametar,
- $\xi_{op}$  Irribarenov parametar,
- $\rho_r \qquad gustoća \ obloge, \ [kg/m^3],$
- $\chi$  faktor vremenske razlike djelovanja sila, [1],
- $\rho_w$  gustoća vode, [kg/m<sup>3</sup>].

Popis literature:

- 1. Liu, Jong; Li, Yucheng; Teng, Bin; "WAVE INTERACTION WITH A NEW TYPE PERFORATED BREAKWATER"; Acta Mech Sin (2007)
- 2. Suh, Kyumg-Duck; Park, Jae Kil; Park, Woo Sun: "WAVE REFLECTION FROM PARTIALLY PERFORATED-WALL CAISSON BREAKWATER"; Ocean Engineering 33 (2006), 264-280.
- 3. Teng, B.; Zhang, X.T.; Ning, D.Z.: "INTERACTION OF OBLIQUE WAVES WITH INFINITE NUMBER OF PERFORATED CAISSONS"; Ocean Engineering 31 (2004); 615-632
- 4. Li, Yucheng; Dong, Guohai; Liu, Hongjie; Sun, Dapeng; "THE REFLECTION OF OBLIQUE INCIDENT WAVES BY BREAKWATERS WITH DOUBLE-LAYERED PERFORATED WALL"; Coastal Engineering 50 (2003); 47-60
- 5. Brossard, J.; Jarno-Druaux, A.; Marin, F.; Tabet-Aoul, E.H.: "FIXED ABSORBING SEMI-IMMERSED BREAKWATER"; Coastal Engineering 49 (2003); 25-41
- 6. Requejo, S.; Vidal, C.; Losada, I.J.: "MODELING OF WAVE LOADS AND HYDRAULIC PERFORMANCE OF VERTICAL PERMEABLE STRUCTURES"; Coastal Engineering 46 (2002); 249-276
- 7. Suh, Kyung Doug; Choi, Jae Chun; Kim, Bum Hyoung; Park, Woo Sun; Lee, Kil Seong: "REFLECTION OF IRREGULAR WAVES FROM PERFORATED-WALL CAISSON BREAKWATERS"; Coastal Engineering 44 (2001); 141-151
- 8. Isaacson, Michael;baldwin, John; Allyn, Norman; Cowdell, Stan;"WAVE INTERACTIONS WITH PERFORATED BREAKWATER";Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering; October 2000.
- Williams, Neil; Mansour, Alaa-Eldin; Lee, Hong Sik: "SIMPLIFIED ANALYTICAL SOLUTION FOR WAVE INTERACTION WITH ABSORBING-TYPE CAISSON BREAKWATERS"; Ocean Engineering 27 (2000), 1231-1248.
- 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
- 11. 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).
- 12. 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).
- 13. Liberatore, L.:"EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON WAVE-INDUCED FORCES ON JARLAN TYPE PERFORATED BREAKWATERS"; Atti del XIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche; 1974; Napoli, Italy; 101-109 (in Italian)
- 14. Kondo, H. "ANALYSIS OF BREAKWATER HAVING TWO POROUS WALLS" Coastal Structures '79., II, ASCE, (1979).; 962-977.

- 15. Sawaragi, T.; Iwata, K.: "IRREGULAR WAVE ATTENUATION DUE TO A VERTICAL BARRIER WITH AIR CHAMBER" Coastal Structures 79, ASCE, (1979); 29-47
- 16. Zhu, S.; Chwang, A.: "INVESTIGATIONS ON THE REFLECTION BEHAVIOUR OF A SLOTTED SEAWALL"; Coastal Engineering 43 (2001); 93–104
- 17. 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 3<sup>th</sup>, Emmelord, (1994)
- 18. Allsop, N.W.H; Hettiarachichi S. S. L.: "REFLECTION FROM COASTAL STRUCTURES"; Proc 21st ICCE, ASCE, Malaga, (1988); 782-794
- 19. 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)
- 20. Allsop, N.W.H; McBride M.W.: "REFLECTION FROM VERTICAL WALLS: THE POTENTIAL FOR IMPROVEMENT IN VESSEL SAFETY AND WAVE DISTURBANCE"; Paper to the 2<sup>nd</sup> MCS Project Workshop, Madrid, October 1993 [and in Proceedings International Workshop on Wave Barriers in Deep Water, Port & Harbour Research Institute, Yokosuka, Japan, 101-128]
- 21. McConnell, K.J.; Ethelston, D.M; Allsop, N.W.H.: "DEVELOPMEN OF NEW STRUCTURES AND APPLICATION IN HONG KONG"; Coastlines, structures and breakwaters, Thomas Telford, London, (1998)
- 22. 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 28<sup>th</sup> International Conference; Jane McKee Smith, pp. 1364-1376
- 23. Task Committe on Forces on Inclined nad Vertical Wall Structures of the Committee on Waves and Wave forces of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division on the ASCE: "WAVE FORCES ON INCLINED AND VERTICAL WALL STRUCTURES"; (1995), New York; ASCE, pp. 233-258.
- 24. Burcharth, H.; Hawkins, S.; Zanuttigh, B.; Lamberti, A.: ENVIROMENTAL DESIGN GUIDELINES FOR LOW CRESTED COASTAL STRUCTURES; Elsevier, Langford Lane, Kidlington, Oxford, UK, (2007)
- 25. Lara, J. L.; Garcia, N.; Losada, I. J.: "RANS MODELLING APPLIED TO RANDOM WAVE INTERACTION WITH SUBMERGED PERMEABLE STRUCTURES"; Coastal Engineering 53 (2006); 395–417
- 26. Chen, X. F.; Li, Y. C.; Teng, B.: "COMPARISON OF METODS FOR CALCULATING THE WAVE FORCES ON PERFORATED CAISSONS"; Tech. Port Eng. 165 (2)
- 27. Muni Reddy, M. G.; Neelamani, S.: "HYDRODYNAMIC STUDIES ON VERTICAL SEAWALL DEFENCED BY LOW-CRESTED BREAKATER"; Ocean Engineering 32 (2005), 747-764
- 28. Muni Reddy, M. G.; Sannasiraj, S. A.; Natarajan, R.: "NUMERICAL INVESTIGATION ON THE DYNAMICS OF A VERTICAL WALL DEFENCED BY AN OFFSHORE BREAKWATER"; Ocean Engineering 34 (2007), 790-798
- 29. Marks, M.; Jarlan, G. E.: "EXPERIMENTAL STUDY ON A FIXED PERFORATED BREAKWATER", Proc. 11th Coastal Engineering Conference, III, (1968), ASCE, 1121-1140

- 30. Terret, F. L.; osorio, J. D. C.; Lean, G. H.: "MODEL STUDIES OF A PERFORATED BREAKWATER"; Proc. 11th Coastal Engineering Conference, III, (1968), ASCE, 1104-1120
- 31. Richey, E. P.; Sollit, C. K.: "WAVE ATTENUATION BY POROUS WALLED BREAKWATER"; Proc., (1970), ASCE, 3, 643-663
- 32. Sawaragi, T.; Iwata, K.: "ON WAVE DEFORMATION DUE TO PERMEABLE STRUCTURES", Coastal Engineering in Japan, 16, (1973),107-122
- 33. Sawaragi, T.; Iwata, K.: "WAVE ATTENUATION OF A VERTICAL BREAKWATER WITH TWO AIR CHAMBERS", Coastal Engineering in Japan, 21, (1978),63-74
- 34. Sawaragi, T.; Iwata, K.: "IRREGULAR WAVE ATTENUATION DUE TO A VERTICAL BARRIER WITH AIR CHAMBER", Coastal Structures, 79, ASCE, (1979), 29-47
- 35. Hattori, M.: "TRANSMISSION OF WAVES TROUGH PERFORATED WALL", Coastal Engineering in Japan, 15, (1972),69-79
- 36. Ippen, A. T.: "ESTUARY AND COASTLINE HYDRODINAMICS", McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y., (1966), 506-507
- 37. Natale, L.: "REDUCTION OF CLAPOTIS IN FRONT OF PERFORATED BREAKWATERS", Giornale del Genio Civile, (Sept.), (1983), 245-256l
- 38. Fugazza, M.; Natale, L.: "HYDRAULIC DESIGN OF PERFORATED BREAKWATERS", Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol. 118, No. 1, (1992)
- 39. Kakuno, S., Liu, P.L.-F.: "SCATTERING OF WATER WAVES BY VERTICAL CYLINDERS", Journal of Waterways, Harbours Coastal Engineering Division, ASCE, (1993), 119, 302-322
- 40. Mei, C. C., Liu, P.L.-F., Ippen, A.T.: "QUADRATIC LOSS AND SCATTERING OF LONG WAVES", Journal of Waterways, Harbours Coastal Engineering Division, ASCE, (1974), 100, 217-239
- 41. Park, W. S., kim, B. H., Suh, K. D., Lee, K. S.: "SCATTERING OF IRREGULAR WAVES BY VERTICAL CYLINDERS", Coastal Engineering Journal, 42, (2000), 253-271.
- 42. Suh, K. D., Park, W. S., "WAVE REFLECTION FROM PERFORATED-WALL CAISSON BREAKWATERS", Coastal Engineering 26, (1995), 177–193
- 43. Goda, Y., "RANDOM SEAS AND DESIGN OF MARITIME STRUCTURES", Tokyo: University of Tokyo Press, (1985), 323 pp.
- 44. Canel, M.: "DISSIPATIVE MONOLITHIC BREAKWATERS: SOME ASPECTS OF HYDRODINAMICS", Final Proceedings, MAST II, MCS-Project: Monolithic (Vertical) Coastal Structures, Alderney, U.K., Paper 4.11, 34 pp.
- 45. Takahashi, S., Tanimoto, K., Shimosako, K: "A PROPOSAL OF IMPULSIVE PRESSURE COEFFICIENT FOR THE DESIGN OF COMPOSITE BREAKWATERS", Proceedings International Conference on Hydro-Technical Engineering for Port and Harbour Construction, (1994), (Hydro-Port), Yokosuka, Japan, vol. 1, Part 1, pp 489-504.
- 46. 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.
- 47. Andročec, 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).

- 48.Li, Y., Liu, H., Teng, B., Sun, D.: "REFLECTION OF OBLIQUE INCIDENT WAVES BY BREAKWATERS WITH PARTIALLY-PERFORATED WALL", China Ocean Engineering, Volume 16, Issue 3, (2002), Pages 329-342
- 49. Andročec, V., Pušić, V., Dolovčak, R., Marković, M., Živković, F., Šikić, A.: "LUKA RIJEKA-ZAGREBAČKA OBALA, Modelska istraživanja utjecaja valova na vertikalnu obalu s prigušnom komorom", Za Lučku upravu Rijeka, Hidrotehnički laboratorij, Građevinski fakultet u Zagrebu, 2006, str. 16
- 50. Takahashi, S. Tanimoto, K. Miyanaga, S.: "UPLIFT WAVE FORCES DUE TO COMPRESSION OF ENCLOSED AIR LAYER AND THEIR SIMILITUDE LAW", Coastal Engineering Journal, Volume 28, (1985), Pages 191-206
- 51. 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
- 52. 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
- 53. Goda, Y.: "RANDOM SEAS AND DESIGN OF MARITIME STRUCTURES", 2nd edn. World Scientific, Singapore, , (2000), 443 pp.
- 54. Suh, Kyung Doug; Son, Sang Young; Lee, Jong In; Lee, Tae Hwan: "CALCULATION OF IRREGULAR WAVE REFLECTION FROM PERFORATED-WALL CAISSON BREAKWATERS USING A REGULAR WAVE MODEL", Coastal Engineering, (2002): Solving Coastal Conundrums: Proceedings of the 28th International Conference : 7-12 July 2002, Cardiff Hall, Cardiff Wales, Jan Smith McKee
- 55. Zelt, J. A., Skjelbreia, J. E.: "ESTIMATING INCIDENT AND REFLECTED WAVE FIELDS USING AN ARBITRARY NUMBER OF WAVE GAUGES", Coastal Engineering, (2002)
- 56. Lara, J.L., Garcia, N., Losada, I.J.: "RANS MODELLING APPLIED TO RANDOM WAVE INTERACTION WITH SUBMERGED PERMEABLE STRUCTURES"; Coastal Engineering 53, (2006), 395–417
- 57. Madsen, P.A., Sørensen, O.R., Schäffer, H.A.: "SURF ZONE DYNAMICS SIMULATED BY A BOUSSINESQ TYPE MODEL. PART I. MODEL DESCRIPTION AND CROSS-SHORE MOTION OF REGULAR WAVES"; Coastal Engineering 32, (1997), 255-287
- 58. Battjes, J.A., Janssen, J.P.F.M.: "ENERGY LOSS AND SET-UP DUE TO BREAKING OF RANDOM WAVES"; Proceedings of the 16th Int. Conf. Coast. Eng. Hamburg, Germany, (1978), pp. 569– 587.
- 59. Seabrook, S. R., Hall, K. R.: "WAVE TRANSSMISION AT SUBMERGED RUBBLE MOUND BREAKWATERS"; Proc. 26TH Int. Conf. on Coast. Engineering, (1998), ASCE, 2000-2013.
- 60. D'Angremond, K., Van der Meer, de Jong, R.J.:"WAVE TRANSSMISION AT LOW-CRESTED STRUCTURES"; ASCE, Proc. ICCE, Orlando, (1996), Florida, 3305-3318.

- 61. Buccino, M., Calabrese, M.: "CONCEPTUAL APPROACH FOR PREDICTION OF WAVE TRANSMISSION AT LOW-CRESTED BREAKWATERS"; Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, (2007),ASCE, May/June.
- 62. Van der Meer, J.W., Wang, B., Wolters, A., Zanuttigh, B., Kramer, M.: "OBLIQUE WAVE TRANSMISSION OVER LOW-CRESTED STRUCTURES", ASCE, Proc. Coastal Structures, Portland, Oregon, (2003).
- 63. Van der Meer, J.W., Regeling, H.J., de Waal, J.P.: "WAVE TRANSMISSION: SPECTRAL CHANGES AND ITS EFFECT ON RUN-UP AND OVERTOPPING", ASCE, Proc.ICCE, , Sydney, Australia,2156-2168, (2000).
- 64. Briganti, R., Van der Meer, J.W., Buccino, M., Calabrese, M.: "WAVE TRANSMISSION BEHIND LOW CRESTED STRUCTURES", ASCE, Proc. Coastal Structures, Portland, Oregon (2003).
- 65. CUR/CIRIA, Rock Manual, Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering, CUR Report 154, The Netherlands, CIRIA Special Publication 83, UK, (1991).
- 66. Van der Meer, J.W., Regeling, E., de Waal, J.P.: "A CODE FOR DIKE HEIGHT DESIGN AND EXAMINATION", Coastlines, Structures and Breakwaters, Proc.ICE, Editor N.W.H. Allsop, London, 5-19, (1998).
- 67. Allsop, N.W.H., Channel, A.R.: "WAVE REFLECTIONS IN HARBOURS: REFLECTION PERFORMANCE OF ROCK ARMOURED SLOPES IN RANDOM WAVES", Hydraulic Research, Wallingford, Report OD 102, (1989).
- 68. Vidal, C., Losada, M.A., Medina R., Mansard, E.P.D., Gomez-Pina, G.: "A UNIVERSAL ANALYSIS FOR THE STABILITY OF BOTH LOW-CRESTED AND SUBMERGED BREAKWATERS", proc. 23rd Int.Conference on Coastal Engineering, 1679-1692, Italy, (1992).
- 69. Burger, G.: "STABILITY OF LOW-CRESTED BREAKWATERS", MSc. Thesis Delft University, report H1878/H2415 and Final Proceedings, EU research project Rubble mound breakwater failure modes, MAST 2 contract MAS2-CT92-0042, (1995)
- 70. Kramer, M., Burchart, H.F.: "STABILITY OF LOW-CRESTED BREAKWATERS IN SHALLOW WATER SHORT CRESTED WAVES", Proc. Coastal Structures, ASCE, 137-149, (2003)
- 71. Battjes, J. A., Groenendijk, H. W.: "WAVE HEIGHT DISTRIBUTIONS ON SHALLOW FORESHORES", Journal of Coastal Engineering 40, 161-182
- 72. Goda, Y., "RANDOM SEAS AND DESIGN OF MARITIME STRUCTURES", (2nd Edition), World Scientific Publishing, (2000), 103-105.
- 73. Hughes, S. A.: "PHYSICAL MODELS AND LABORATORY TECHNIQUES IN COASTAL ENGINEERING", Advanced Series on Ocean Engineering-Volume7, World Scientific, 1993, pp. 502-506.
- 74. Tabet-Aoul, Lamber:" TENTATIVE NEW FORMULA FOR MAXIMUM HORIZONTAL WAVE FORCES ACTING ON PERFORATED CAISSON", Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering, January-February, 2003.