SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET Kačićeva 26, 10000 Zagreb

OPTIMIZACIJA NASIPNIH ZAŠTITNIH GRAĐEVINA U UVJETIMA EKSTREMNE JADRANSKE VALNE KLIME

DOKTORSKI RAD

Eva Ocvirk, dipl.ing.građ., dipl.ing.mat. rujan, 2010.

Sadržaj

Sadržaj	i
Popis slika	iv
Popis tablica	VIII
Uvod	
Predmet i cilj znanstvenog istraživ	anja2
Metodologija istraživanja	2
1 Numeričko modeliranje volovo	A
1 1 Povijesni predled razvoja m	odelirania valova 4
1.2 Pregled stania područia	
1.2.1 Formulacija problema.	
1.2.2 Generiranje valova vjet	rom10
1.2.3 Nelinearno međudjelov	anje valova u diskretnim valnim modelima17
1.2.4 Spektralna disipacija u	dubokom23
1.2.5 Nelinearno međudjelov	anje u plitkom28
1.2.6 Disipacija na dnu	
1.2.7 Numerika i rezolucija u	valnom modeliranju
1.3 Zakijucak	
2 Prikaz numeričkog modela – MI	XE 21/SW/ 37
2 1 Osnovne jednadžbe	38 XL 21/3W
2.2 Funkcije izvora i ponora	
2.2.1 Utiecai vietra	
2.2.2 Nelinearno međudielov	anie40
2.2.3 Površinski lom valova.	
2.2.4 Trenje na dnu	41
2.2.5 Lom valova uslijed pro	mjene dubine42
2.3 Numerička implementacija	
2.3.1 Prostorna diskretizacija	
2.3.2 Vremenska integracija.	
2.3.3 Rubni uvjeti	
3 Modeli za kratkoročnu valnu pro	
3 1 Jadranski model za kratkor	20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 2
3.1.1 Ulazni podaci – geome	trija i vietar
3.1.2 Opis modela	
3.1.3 Analiza osjetljivosti i ka	libracija modela50
3.1.4 Zaključak	
3.1.5 Kratkoročna prognoza	jadranski model – rezultati63
3.2 Lokalni model za kratkoroči	nu prognozu – Split66
3.2.1 Ulazni podaci – geome	trija i vjetar66
3.2.2 Opis modela	
3.2.3 Analiza osjetljivosti i ka	libracija modela71
3.2.4 Zakijučak	
3.2.5 Kratkorocna prognoza	iokaini model – rezultati

4	Modeli z 4.1 Dug 4.2 Dug 4.2.1 modela / 4.2.2 4.2.3 vjetru	a dugoročnu valnu prognozu joročna valna klima – Jadranski model joročna valna klima – lokalni model Dugoročna valna klima na temelju podataka o vjetru iz prognost ALADIN Dugoročna valna klima na temelju podataka o vjetru s mjernih postaja Usporedba rezultata dobivenih korištenjem različitih ulaznih podata	81 82 88 tičkog 88 a91 aka o 94
5	Dimenzie 5.1 Proj 5.2 Hidr 5.2.1 5.2.2 5.2.3 5.2.4 5.3 Stat 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6	oniranje primarne obloge nasipnih zaštitnih građevina (stanje područja jektiranje poprečnog presjeka nasipnih građevina raulička djelovanja Izdizanje i poniranje vala (<i>wave run-up, run-down</i>) Prelijevanje. Transmisija. Refleksija bilnost obloge pokosa nasipnih lukobrana Irribarenova formula Van der Meerova formula. Oštećenje obloge Usporedba formula stabilnosti. Stabilnost konstrukcija s niskom krunom i potopljenih konstrukcija	i)96 100 102 104 104 106 106 107 108 111 112 115 117
6	Terensk	o istraživanje postojećih nasipnih lukobrana na Jadranu	118
7 val	Optimiza Ine klime 7.1 Opti 7.2 Prin obloge nas 7.2.1 7.2.2 7.3 Zak	acija primarne obloge nasipnih zaštitnih građevina u uvjetima jadra imizacija troškova gradnje i održavanja nasipnih zaštitnih građevina njena prikazane metode optimizacije na primjeru dimenzioniranja prir sipnih lukobrana u uvjetima jadranske valne klime Primjer 1 – lukobran na sjevernom Jadranu Primjer 2 – lukobran u splitskom akvatoriju	anske 123 narne 125 126 131 136
8	Zaključa 8.1 Defi 8.2 Opti 8.3 Prej 8.4 Leg 8.5 Prej	k iniranje jadranske valne klime imizacija nasipnih zaštitnih građevina poruke za projektiranje nasipnih zaštitnih građevina na Jadranu islativni aspekt jadranske valne klime poruke za nastavak istraživanja	137 137 139 139 139 140 140
Po	pis korište	nih oznaka	141
Lit	eratura DODAT/ DODAT/ odgovara DODAT/ modela i	AK A – Podaci dobiveni mjerenjem valnih visina na valografima AK B – Jadranski model – najzanimljivije situacije polja vje ajuća polja valnih visina po godinama AK C – Tablice učestalosti vjetra po postajama korištenim u defin raspodjele brzina vjetra s mjernih postaja na polje vjetra	143 153 etra i 156 iranju 182

DODATAK D - Formiranje modela raspodjele brzine vjetra s mjernih postaja na
polje brzina vjetra
DODATAK E – Dugoročna valna klima Jadrana po smjerovima za različita povratna
razdoblja203
DODATAK F – Detaljan opis postupka ispitivanje stanja školjere i proračuna valnih
visina "preživljavanja" lukobrana215

Popis slika

Slika 1-1 Izdizanje površine kao zbroj niza nezavisnih linearnih valova [Holthuijsen]	. 7
Slika 1-2 Skup relevantnih zraka u nekoj predikcijskoj točki [Holthuijsen]	. 8
Slika 1-3 Pronos energije kroz jednu ćeliju pravilne mreže u Eulerovom pristupu [Holthuijsen]	. 9
Slika 1-4 Osnovne faze mehanizma generiranja vjetrovnih valova	11
Slika 1-5 Ulazni član utjecaja vjetra za JONSWAP spektar u dubokom (definirano pomoću formulac	cije
inicijalne generacije prema Cavaleri i Malanotte-Rizzoli, 1981., i modelom Miles-a, 1957.,	ża
$H_{m0}=3.5m$, $T_{p}=7s$ i $U_{10}=20m/s$) [Holthuijsen]	15
Slika 1-6 Triad - valno međudjelovanje [Holthuijsen]	18
Slika 1-7 Quadruplet valno međudjelovanje (u dubokom) [Holthuijsen]	18
Slika 1-8 Ulazni član međudielovania za JONSWAP spektar u dubokom moru (definirano WRT (Wel	ob.
Tracy, Resio. 1982.) tehnikom van Vledder 2006., za H_2 =3.5m, T_2 =7s) [Holthuijsen].	19
Slika 1-9 Ulazni član površinskog loma valova, za JONSWAP spektar u dubokom i plitkom (definirano	bo
Hasselmannu 1974 za $H_{a=3}$ 5m i T_{a} =7s) [Holthuiisen]	24
Slika 1-10 Ulazni član međudielovanja za JONSWAP spektar u plitkom (definirano I TA aproksimaciji	om.
(Eldeberky 1996) za $H_{=3}$ 5m $T_{=}$ =7s) [Holthuijsen]	29
Slika 1-11 I llazni član trenja na dnu za IONSWAP spektar u plitkom (za $H=3.5m$, $T_c=7s$) [Holthuijsen]	31
Since $T = 0.000$ of $T_p = 0.0000$ of $T_p = 0.0000000000000000000000000000000000$	01
Slika 2-1 Dvije konfiguracije interakcije korišene u DIA (Komen i dr. 1994.)	40
Slika 3-1 Prostorna domena numeričkog modela sa batimetrijskom podlogom i prostorno	om
disktretizacijom sa trokutnim konačnim volumenima	47
Slika 3-2 Detali prostorne domene numeričkog modela sa batimetrijskom podlogom i prostorno	nm
disktretizacijom sa trokutnim konačnim volumenima	18
Slika 3-3 Podiela Jadrana na tri karakteristična područia: Sieverni, Sredniji i Južni Jadran	18
Slika 3-4 Drikaz osnovnih smierova vietra no kojima je provedena analiza	10
Slika 3-4 Frikaz Osnovnih Shijelova vjetla po kojima je provedena analiza	49 50
Slika 3-5 Pozicije valografska plutača tvrtka Datawali usidrana u maru	50
Slika 3-0 Valografska plulaca tvrtke Dalaweli usiurena u moru.	
Sinka 5-7 Osporeuba izmjerenog i modeliranog miza značajnih valnih visina ovisno o odabilu iomulat	ле БО
Pilika 2 9 Llanaradha izmiaranag i madaliranag niza značajnih valnih visina na pozisiji valografska post	
Sinka 5-6 Osporeoba izmjerenog i modeliranog niza značajnih valnih visina na poziciji valograjske post	aje
V I u ovisnosti o osjetijivosti na pojedine kalibracijske parametre	53
Sinka 5-9 Osporeoba izmjerenog i modeliranog niza značajnih valnih visina na poziciji valograjske post	aje
V2 u ovisnosti o osjetiljivosti na pojedine kalibracijske parametre	53
Silka 3-10 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza znacajnih valnih visina na pozi	CIJI
valografske postaje v1 u nekoliko zanimijivin situacija	55
Slika 3-11 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina na pozi	CIJI
valografske postaje V2 u nekoliko zanimljivih situacija	56
Slika 3-12 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina H_s (gore	;) i
maksimalnih valnih visina H_{max} (dolje) na poziciji valografske postaje V1 u razdoblju	od
01.11.2007. do 29.05.2008	57
Slika 3-13 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina H_s (gore	;) i
maksimalnih valnih visina H_{max} (dolje) na poziciji valografske postaje V1 u razdoblju	od
01.06.2008. do 15.11.2008	58
Slika 3-14 Omjeri izmjerenih i modeliranih značajnih valnih visina na poziciji valografa V1 u terminima	аu
kojima se pojavljuju ekstremi valnih visina i ekstremi prognoziranih brzina vjetra (po smjerovin	na)
tijekom analiziranog perioda	59
Slika 3-15 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina H _s (gore) i
maksimalnih valnih visina H _{max} (dolje) na poziciji valografske postaje V2 u razdoblju od 1.11.20	Ó7.
do 15.6.2008	59
Slika 3-16 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina H _s (gore	e) i
maksimalnih valnih visina H _{max} (dolje) na poziciji valografske postaje V1 u razdoblju	od
20.08.2008. do 15.11.2008.	60
Slika 3-17 Omjeri izmjerenih i modeliranih značajnih valnih visina na poziciji valografa V2 u terminima	a u
kojima se pojavljuju ekstremi valnih visina i ekstremi prognoziranih brzina vietra (po smierovin	na)
tijekom analiziranog perioda	60

Slika 3-18 Modelsko polje značajnih valnih visina H_s u terminu izmjerenog ekstrema H_s postignutog na poziciji valografske postaje V1 (23.11.2007. 12.00-18.00 - SE) i pripadno polje vjetra prema Slika 3-19 Modelsko polje značajnih valnih visina H_s u terminu izmjerenog ekstrema H_s postignutog na poziciji valografske postaje V2 (06.03.2008. - NE) i pripadno polje vjetra prema modelu ALADIN Slika 3-20 Polje brzina vjetra i polje značajnih valnih visina definirano različitim modeloma u situaciji juga 08.03.2001. – usporedba rezultata dobivenih u ovom radu (gore) i rezultata objavljenih u radu Slika 3-21 Polje brzina vjetra i polje značajnih valnih visina definirano različitim modeloma u situaciji juga 31.03.2001. - usporedba rezultata dobivenih u ovom radu (gore) i rezultata objavljenih u radu Slika 3-23 Gaussova distribucija za podatke 1966.-2007. (lijevo) i za podatke 1997.-2007. (desno)..... 68 Slika 3-24 Razdioba podataka po razredima brzina za podatke 1966.-2007. (lijevo) i za podatke 1992.-2001. (desno) – prikazane brzine odgovaraju srednjim vrijednostima promatranih razreda brzina, a u zadnjem razredu su sve vrijednosti veće od 17m/s......68 Slika 3-25 Prostorna domena lokalnog numeričkog modela - Split sa batimetrijskom podlogom (korištena prostorna rezolucija batimetrijskih podataka je 7,5")......70 Slika 3-26 Diskretizacija prostorne domene lokalnog modela sa nestrukturiranom mrežom trokutnih konačnih volumena......71 Slika 3-27 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina H_s na poziciji Slika 3-28 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina H_s (gore) i maksimalnih valnih visina H_{max} (dolje) na poziciji valografske postaje V2 u razdoblju od Slika 3-29 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina H_s (gore) i maksimalnih valnih visina H_{max} (dolje) na poziciji valografske postaje V2 u razdoblju od Slika 3-30 Omjeri izmjerenih i modeliranih značajnih valnih visina na poziciji valografa V2 u terminima u kojima se pojavljuju ekstremi valnih visina i ekstremi prognoziranih brzina vjetra (po smjerovima) Slika 3-31 Usporedba izmjerenog i različitim ulaznim podacima o vjetru modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina na poziciji valografske postaje V2 u nekoliko zanimljivih situacija bure ... 75 Slika 3-32 Usporedba izmjerenog i različitim ulaznim podacima o vjetru modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina na poziciji valografske postaje V2 u nekoliko zanimljivih situacija juga ... 75 Slika 3-33 Usporedba polja valnih visina dobivenih korištenjem podataka o vjetru iz modela ALADIN i brzina vjetra iz modela definiranih u radu - smjer W, 01.08.2000. (polje vjetra - ALADIN, polje značajnih valnih visna prema podacima o vjetru iz ALADINa, polje značajnih valnih visina prema podacima o vjetru u radu definiranog modela)......77 Slika 3-34 Usporedba polja valnih visina dobivenih korištenjem podataka o vjetru iz modela ALADIN i brzina vjetra iz modela definiranih u radu - smjer W, 13.09.1998. (polje vjetra - ALADIN, polje značajnih valnih visna prema podacima o vjetru iz ALADINa, polje značajnih valnih visina prema podacima o vjetru u radu definiranog modela)......78 Slika 3-35 Usporedba polja valnih visina dobivenih korištenjem podataka o vjetru iz modela ALADIN i brzina vjetra iz modela definiranih u radu - smjer SW, 08.01.2001. (polje vjetra - ALADIN, polje značajnih valnih visna prema podacima o vjetru iz ALADINa, polje značajnih valnih visina prema Slika 3-36 Usporedba polja valnih visina dobivenih korištenjem podataka o vjetru iz modela ALADIN i brzina vjetra iz modela definiranih u radu - smjer SE, 13.12.1995. (polje vjetra - ALADIN, polje značajnih valnih visna prema podacima o vjetru iz ALADINa, polje značajnih valnih visina prema Slika 4-2 Karta valova smjera NE povratnog razdoblja 30 godina na području Jadrana...... 83

Slika 4-8 Karta valova smjera NW povratnog razdoblja 30 godina na području Jadrana Slika 4-9 Karta valova smjera N povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vjetru ALA	. 86 DIN 88
Slika 4-10 Karta valova smjera NE povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vje ALADIN.	etru
Slika 4-11 Karta valova smjera E povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vjetru ALA	DIN . 89
Slika 4-12 Karta valova smjera SE povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vje ALADIN	etru . 89
Slika 4-13 Karta valova smjera S povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vjetru ALA	DIN . 89
Slika 4-14 Karta valova smjera SW povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vje ALADIN	etru . 90
Slika 4-15 Karta valova smjera W povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vje ALADIN	etru . 90
Slika 4-16 Karta valova smjera NW povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vje ALADIN	etru . 90
Slika 4-17 Karta valova smjera N povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model	. 91
Slika 4-18 Karta valova smjera N povratnog razdoblja 100 godina – lokalni model	. 91
Slika 4-19 Karta valova smjera NE povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model	. 92
Slika 4-20 Karta valova smjera NE povratnog razdoblja 100 godina – lokalni model	. 92
Slika 4-21 Karta valova smjera E povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model	. 92
Slika 4-22 Karta valova smjera E povratnog razdoblja 100 godina – lokalni model	. 93
Slika 4-23 Karta valova smjera SE povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model	. 93
Slika 4-24 Karta valova smjera SE povratnog razdoblja 100 godina – lokalni model	. 93
Slika 4-25 Karta valova smjera S povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model	. 94
Slika 4-26 Karta valova smjera S povratnog razdoblja 100 godina – lokalni model	. 94
Slika 5-1 Tipični poprečni presjek nasipnog lukobrana u dubokom	. 96
Slika 5-2 Tipični poprečni presjek nasipnog lukobrana u plitkom	. 97
Slika 5-3 Osnovni hidraulički procesi koji djeluju na nasipnu zaštitnu građevinu	101
Slika 5-4 Tipovi loma na pokosu i pripadni parametar loma	101
Slika 5-6 Koeficijent propusnosti u ovisnosti o tipu konstrukcije	104
Slika 5-7 Usporedba koeficijenta stabilnosti ovisno o nagibu pokosa prema Hudsonovoj i Van	der
Meerovoj formuli u slučaju bez oštećenja	116
Slika 5-8 Usporedba koeficijenta stabilnosti ovisno o nagibu pokosa prema Hudsonovoj i Van	der
Meerovoj formuli u slučaju srednjeg oštećenja	116
Slika 5-9 Usporedba koeficijenta stabilnosti ovisno o nagibu pokosa prema Hudsonovoj i Van	der
Meerovoj formuli u slučaju sloma	117
Slika 6.1 Proglad spimlionih lakasija	110
Slika 6-1 Pregled snimljenin lokacija	110
Slika 6-2 Pogled na pokos primarnog lukoprana u Omagu	121
Silka 6-3 Detaij ostecenja na pokosu lukobrana u Novigradu	121
Slika 6-4 Pogled i detalj novog lukobrana notela Lav u Podstrani kod Splita	122
Siika 6-5 Primarni lukodran u Spiitu	122
Slika 7-1 Optimizacija presjeka nasipnog lukobrana	131
Slika 7-2 Optimizacija presjeka nasipnog lukobrana	136
Slika D-1 Prostorni raspored mjernih postaja i karakterističnih točaka u kojima su provedene prelimina	arne
analize zavisnosti brzine vjetra u polju i brzine vjetra na postajama	183
Slika D-2 Linearna i eksponencijalna interpolacija zavisnosti brzine vjetra na postaji Split-Marjan i brz	zine
vjetra definirane prognostičkim modelom ALADIN u točki T1 u smjeru NE (S4) i smjeru SE (S	512)
uz korištenje svih podataka i uz korištenje samo brzina većih od 5m/s	184
Slika D-3 Linearni koef. korelacije po postajama i smjerovima u promatranim točkama T1-T4 u sluč	5aju
pretpostavljene linearne i eksponencijalne zavisnosti	186
Slika D-4 Prikaz rezultata dobivenih različitim modelima u promatranim točkama T1-T4 za smjerove b	oure
(NE-S4) i juga (SE-S12)	187
Slika E-1 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer N	203

Slika E-2 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer N	203
Slika E-3 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer N	204
Slika E-4 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer NE	204
Slika E-5 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer NE	205
Slika E-6 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer NE	205
Slika E-7 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer E	206
Slika E-8 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer E	206
Slika E-9 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer E	207
Slika E-10 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer SE	207
Slika E-11 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer SE	208
Slika E-12 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer SE	208
Slika E-13 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer S	209
Slika E-14 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer S	209
Slika E-15 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer S	210
Slika E-16 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer SW	210
Slika E-17 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer SW	211
Slika E-18 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer SW	211
Slika E-19 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer W	212
Slika E-20 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer W	212
Slika E-21 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer W	213
Slika E-22 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer NW	213
Slika E-23 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer NW	214
Slika E-24 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer NW	214
Slika F-1 Makrolokacija i mikrolokacija lukobrana Kaše	215
Slika F-2 Položaj profila PPR1 do PPR4 na lukobranu Kaše	216
Slika F-3 Granulometrijska krivulja školjere po profilima (gornji red PPR1 i PPR2, donji red PPR3	i PPR4)
	219
Slika F-4 Poprečni presjeci po profilima (gornji red PPR1 i PPR2, donji red PPR3 i PPR4)	221
Slika F-5 Definicijska skica koeficijenta broja blokova u ispitivanom sloju školjere "n"	221
Slika F-6 Skica sila na bloku dobro ukliještene obloge.	223
Slika F-7 Ovisnost koeficijenta stabilnosti K _D za širokograduiranu ukliještenu školjeru na tijelu luk	kobrana
kod nelomljenih valova o broju kontakata sa susjednim blokovima	226
Slika F-8 Batimetrija Lokrumskog prolaza i gradske luke Dubrovnik	228
Slika F-9 Vrijednosti koeticijenata refleksije za pojedine djelove obale	228
SIIKA F-10 Prikaz profila i tocaka ocitanja vrijednosti deformirane valne visine iz matematičkog mo	odela za
promatrane smjerove	229

Popis tablica

Tablica Tablica	3–1 Modeli formirani za analizu osjetljivosti numeričkog modela	52 ra 54
Tablica	3–3 Parametri provjerenih distribucija za podatke iz različitih perioda: gornji red 1966.–2007 donji red 1992.–2001	7., 39
Tablica	3–4 Vrijednosti srednje greške i korijena srednjeg kvadratnog odstupanja pri promjeni paramet C_{dis} u slučaju usporedbe svih valnih visina i u slučaju usporedbe viših valnih visina na mjes valografa V2.	ra tu 71
Tablica	4-1 Rezultati dugoročne jadranske valne klime po smjerovima i područjima za povratno razdob 30 godina	lje 37
Tablica	5-1 Koeficijenti a, b, c, d za razine premašenja <i>i=0,1%, 1%, 2%, 5%, 10%,</i> značajnu i sredn razinu izdizanja kod kamenih pokosa	iju 13
Tablica	5-2 Koeficijenti a i b koji se koriste u izrazu 5-16 u slučaju glatkih pokosa (Owen 1980))5
Tablica	5-3 Projektne vrijednosti bezdimenzionalnog parametra oštećenja ovisno o nagibu pokosa	ιi 12
Tablica	5-4 Postoci oštećenja primarne obloge	16
Toblico	6.1. Pozultoti toropolih jotroživanja	20
Tablica	6-1 Rezultati terenskin istrazivanja	20
Tablica	7-1 Podaci o valnoj klimi odabrane lokacije na Sjevernom Jadranu	27
Tablica	7-2 Trošak izgradnje lukobrana projektiranog valnim visinama različitih povratnih razdoblja 12	27
Tablica	7-3 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratno razdoblja 5 godina	2g 28
Tablica	7-4 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratno razdoblja 10 godina	2g
Tablica	7.5 Prociena oštećenia i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratov	20
Tablica	razdoblja 20 godina	28
Tablica	7-6 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratno razdoblja 30 godina	og 29
Tablica	7-7 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratno	bg
	razdoblja 40 godina 12	29
Tablica	7-8 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratno razdoblja 50 godina	эд 29
Tablica	7-9 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratno razdoblja 100 godina	og so
Tablica	7-10 Troškovi gradnje i održavanja na godišnjoj razini u ovisnosti o povratnom razdoblju projekti velno visino	ne
Tabliaa	7 11 Dedesi e velnej klimi odebrene lekecije na Sjevernem ledrenu	20
Tablica	7-11 Foudul o valnoj kilili oudorane lokacije na Sjeveniom Jauranu)と)つ
Tablica	7-12 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratni	oz og
	razdoblja 5 godina	33
Tablica	7-14 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratno	bg
Tablica	7-15 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratno	ss Sg
	razdoblja 20 godina	33
Tablica	7-16 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratno	og ₂⊿
Tablica	7-17 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratno	э ч Эд
Tablist	razdoblja 40 godina	34
i adlica	razdoblja 50 godina	og 34
Tablica	7-19 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratno	2g 35
		~

Tablica 7-20 Troškovi gradnje i održavanja na godišnjoj razini u ovisnosti o povratnom razdoblju pro valne visine	ojektne 135
Tablica 8-1 Rezultati dugoročne jadranske valne klime po smjerovima i područjima za povratno raz 30 godina	<u>z</u> doblje 138
Tablica D-1 Oznake smjerova vjetra korištene u grafičkim prikazima	184
Tablica F-1 Formular opažania veličina kamenih blokova nad morem	217
Tablica F-2 Granulometrijski sastav po profilima	218
Tablica F-3 Standardne granice široko graduirane granulometrijske krivulje primarnog sloja školjere	219
Tablica F-4 Standardne granica široko graduirane granulometrijske krivulje primarnog sloja školj profilima	ere po 219
Tablica F-5 Određivanje širine granulometrijske krivulje	220
Tablica F-5 Tablica procjene dužina i izračuna površina pojedinih sekcija	220
Tablica F-6 Tablica izračuna poroziteta p[%] i zapremninske gustoće mase γ_{kam}^{zapr} [t/m ³] školjere	222
Tablica F-7 Orijentacijske vrijednosti koeficijenta stabilnosti <i>K</i> _D širokograduirane školjere za konsvalnu visinu, za različite ukliještenosti	stantnu 223
Tablica F-8 Formular opažanja broja blokova sa određenim brojem kontakata sa susjednim blokovi	ma224
Tablica F-9 Očitane vrijednosti koeficijenta K _D na osnovu procijenjenih prosječnih brojeva kontaka pripadne 50%-tne težine W _{50%} blokova školjere	ata N i 226
Tablica F-10 Prikaz granulometrijskih značajki školjere lukobrana Kaše	227
Tablica F-11 Koeficijenti deformacije po smjerovima	227
Tablica F-12 Dubokovodne značajne valne visine koje po Hudsonovoj formuli ne utječu na sta lukobrana po smjerovima	bilnost 229

Uvod

Rad je usmjeren na istraživanje optimalne veličine primarne obloge nasipnih zaštitnih građevina po tehničkom i ekonomskom kriteriju. Projektiranje zaštitnih građevina sastoji se od niza inženjerskih postupaka kojima je cilj definiranje optimalne veličine presjeka. U tom postupku za samu građevinu se mogu mijenjati lokacija, trasa i veličina obloge u ovisnosti o projektnim valnim visinama odgovarajućeg povratnog razdoblja. Lokacija i trasa pri tome su direktno ovisne o svakom pojedinom akvatoriju koji je potrebno zaštiti, pa je istraživanje optimizacije presjeka u ovom radu usmjereno samo na definiranje optimalne veličine obloge u funkciji projektnog stanja mora.

Dimenzioniranje zaštitnih građevina tradicionalno se obavlja na ekstremne uvjete valnog okruženja povratnog razdoblja 50–100 godina što u stvari znači izjednačavanje uporabnog vijeka konstrukcije i ekstremnih projektnih uvjeta. Na taj način se vodi računa samo o sigurnosti građevine, a ne i o ekonomičnosti izvedbe i održavanja. Stoga se u ovom radu težište stavlja na moderno projektiranje u duhu europskih normi s provedbom analiza za povratna razdoblja 5–100 godina.

Optimizacija se provodi u smislu minimiziranja ukupnih troškova tj. troškova izgradnje i održavanja građevine na godišnjem nivou. Prema tome, navedeni postupak optimizacije direktno je vezan na poznavanje dugoročne valne klime kojoj je građevina izložena. Obzirom da ne postoji dugoročna valna klima Jadrana, njezino definiranje je primarni zadatak.

Dugoročna valna klima u većini se slučajeva definira na temelju kratkoročne valne klime. Budući nema dostatne direktne registracije kratkoročne valne klime valografima, razvijene su metode njene prognoze iz podataka o vjetru na temelju modela valnog generativnog procesa. Osnovni podaci o vjetru, potrebni kod modeliranja generiranja valova, su brzina i smjer vjetra, trajanje vjetra i duljina privjetrišta. Zbog ograničenja uslijed raspoloživosti potrebnih podataka o vjetru u ovom radu definira se metodologija formiranja dugoročne valne klime manjih akvatorija sličnih dugoročnih karakteristika ovisno o smjeru. Naime, polja vjetra na cijelom području Jadrana dostupna su samo za period od deset godina (1992.–2001.) što nije dostatno za dugoročnu prognozu. Stoga se dugoročna prognoza provodi pomoću podataka o vjetru s mjernih postaja (razdoblja 15 do 40 godina) koji se mogu koristiti samo na lokalnom području, te se formiraju lokalni modeli. U ovom radu definiran je model splitskog akvatorija, ali na istom principu definirali bi se u daljnjim istraživanjima lokalni modeli i ostalih manjih akvatorija sličnih dugoročnih karakteristika.

Dakle, rad je usmjeren na 2 područja, definiranje dugoročne valne klime Jadrana i optimizaciju presjeka nasipnih zaštitnih građevina u ovisnosti o projektnoj valnoj visini odgovarajućeg povratnog razdoblja.

Predmet i cilj znanstvenog istraživanja

Cilj ovog rada je definirati optimalnu veličinu poprečnog presjeka nasipnih zaštitnih građevina obzirom na tehnički i ekonomski aspekt, te na temelju toga dati praktične preporuke za projektiranje. Navedeni postupak optimizacije direktno je vezan na poznavanje valne klime kojoj je lukobran izložen. Iz toga slijedi potreba definiranja dugoročne valne klime Jadrana korištenjem, u tu svrhu formiranog, numeričkog prognostičkog modela valova na temelju podataka o vjetru. Definiranjem dugoročne valne klime ovaj će rad doprinijeti ne samo pomorskom građevinarstvu, nego i drugim pomorskim granama.

Dvije su hipoteze rada:

- Temeljem postojećih podataka o vjetru moguće je formirati karte dugoročne valne klime Jadranskog mora 5–100-godišnjeg povratnog razdoblja.
- Optimalnim projektiranjem može se definirati ekonomičnija konstrukcija od one projektirane tradicionalno na ekstremne uvjete.

Metodologija istraživanja

U radu se primjenjuju stohastičke, analitičke i numeričke metode istraživanja uz upotrebu rezultata istraživanja na terenu.

Kronološki gledano faze istraživanja su:

- definiranje dugoročne valne klime Jadrana (teorijska i eksperimentalna metodologija),
- istraživanje primarne obloge postojećih nasipnih lukobrana (terenska istraživanja),
- optimizacija primarne obloge nasipnih lukobrana u dugoročnoj valnoj klimi Jadrana (teorijska metodologija).

Definiranje dugoročne valne klime Jadrana

Numerički model valne klime Jadrana sastavljen je od dva zasebna dijela: modela za kratkoročnu prognozu i modela za dugoročnu prognozu valne klime.

Model za kratkoročnu prognozu formiran je u dva koraka:

- formiranje i kalibracija jadranskog numeričkog modela za kratkoročnu valnu prognozu
- formiranje i kalibracija lokalnog numeričkog modela za kratkoročnu valnu prognozu.

Potreba za definiranjem ovih modela izlazi iz raspoloživih podataka o vjetru na temelju kojih se provodi prognoza. Naime, na jadranskom numeričkom modelu koriste se podaci o vjetru iz prognostičkog modela ALADIN (podaci iz razdoblja 10 godina), dok se

na lokalnom modelu koriste i podaci s meteoroloških postaja (opažanja i do 40 godina). U oba koraka koristi se numerički model valnog generiranja MIKE 21/SW (DHI, 2009.).

Za prognozu dugoročne valne klime odabranih akvatorija koristi se empirijska distribucija valnih visina dobivenih kratkoročnom prognozom i njena ekstrapolacija u područje malih vjerojatnosti, tj. područje velikih povratnih razdoblja. Na taj način, definira se dugoročna valna klima potrebna u postupku optimizacije primarne obloge nasipnog lukobrana.

Istraživanje primarne obloge postojećih nasipnih lukobrana

Provedeno je terensko istraživanje izvedenih nasipnih lukobrana na području Jadrana u svrhu definiranja dosadašnjeg (tradicionalnog) projektiranja nasipnih lukobrana.

Optimizacija primarne obloge nasipnih zaštitnih građevina u dugoročnoj valnoj klimi Jadrana

Većina zaštitnih građevina na Jadranu su tipa nasipnog lukobrana. Najjednostavniji oblik nasipnog lukobrana je lukobran s obostranim pokosom, koji se sastoji od nekoliko slojeva kamenog materijala različitih granulacija. Pokosi pokriveni zaštitnom oblogom (školjerom) efikasno disipiraju valnu energiju, te izazivaju relativno malu transmisiju i refleksiju. Nadalje, prednost nasutih lukobrana je i fleksibilnost u definiranju geometrije i relativno jednostavna gradnja i održavanje. Temeljni nedostatak ovog tipa lukobrana velika je količina kamenog materijala potrebnog za njegovu konstrukciju, te velika površina koju zauzima na dnu. Poprečni presjek nasipnog lukobrana sastoji se od jezgre obložene filterskim slojevima različitih promjera kamena izvana zaštićene kamenom ili betonskom oblogom. Projektiranje takvog lukobrana zahtjeva definiranje sljedećih elemenata: visine krune, nagiba pokosa, veličine i debljine obloge na kruni i pokosu, visine i dubine pojedinih slojeva, dimenzije i veličinu kamena nožice lukobrana i veličine kamena u filterskom sloju. Sve te parametre potrebno je odrediti na temelju niza međusobno povezanih kriterija kao što su: funkcionalnost, hidraulička stabilnost, dostupnost materijala i geotehnička stabilnost.

Težina stabilnih blokova primarne obloge tradicionalno se proračunava prema Hudsonovom i van der Meerovom izrazu. Oba izraza daju mogućnost proračuna bez i s oštećenjem upravo u svrhu optimizacije. U praksi se uglavnom koriste parametri bez oštećenja (u stvari s 0–5% oštećenja).

Racionalno projektiranje konstrukcije vodi optimalnom presjeku po principu minimiziranja ciljne funkcije. Ciljna funkcija, u ovom slučaju, je zbroj troškova gradnje i održavanja konstrukcije nasipnog lukobrana u ovisnosti o dugoročnoj valnoj klimi definiranoj dugoročnom funkcijom raspodjele vjerojatnosti projektne valne visine.

1 Numeričko modeliranje valova

1.1 Povijesni pregled razvoja modeliranja valova

Općenito razvoj modeliranja valova može se podijeliti na tri ere, prvu eru – eru čisto empirijski temeljenih metoda, drugu eru – eru poluempirijskih spektralnih modela i treću, još uvijek aktualnu, eru numeričkog modeliranja.

Početak prve ere označio je Stevenson, za kojeg bi se moglo reći da je prvi modelirao valove generirane vjetrom kada je definirao najvišu valnu visinu koja će se dostići tijekom oluje ovisno o duljini privjetrišta izrazom $H_{\text{max}} = \sqrt{F}/3$, gdje je H_{max} maksimalna valna visina u metrima, a F duljina privjetrišta u kilometrima. Također postoji još nekoliko empirijskih formula korištenih prije 40-tih godina 20.-tog stoljeća, sličnog oblika. Rossby i Montgomery (1935.) su postavili dimenzionalno korektnu formulu koja je povezala valnu visinu i brzinu vjetra na 10 m iznad površine vode, u_{10} , a koristi se još i

danas $H_{\text{max}} = 0.3u_{10}^2 / g$.

Sverdrup i Munk (1946.) su napravili početni korak u realističnijem modeliranju valova generiranih vjetrom ispitujući razvoj valova na temelju proučavanja energije, privjetrišta i trajanja puhanja vjetra, te uvođenjem pojma značajne valne visine, H_s . Bretschneider (1952., 1958.) je proširio njihova nastojanja dodatnim podacima i razvio općepoznatu SMB (Sverdrup, Munk i Bretschneider) metodu.

Druga era započela je uvođenjem spektralne analize u proučavanjem valova ranih 50tih i formuliranjem Neumannovog spektra, Pierson i dr. 1955 razvijaju prognozu valova temeljenu na spektralnoj analizi, PNJ (Pierson, Neumann i James) metodu. Konačno, okvir za numeričko modeliranje valova generiranih vjetrom postavio je Hasselmann (1963.) kada je postavio zakon očuvanja energije valnog spektra koji je predstavljao bazu moguće točne teorije dinamike valnog spektra u obliku

$$\frac{\partial E(k, x, y, t)}{\partial t} + c_{g, x} \frac{\partial E(k, x, y, t)}{\partial x} = S , \qquad (1-1)$$

pri čemu je *E* energija valnog spektra u funkciji vektora valnog broja \vec{k} , smjera širenja (x, y) i vremena *t*, $c_{g,x}$ brzina promatrane valne grupe u *x* smjeru, a *S* ukupna snaga koja ulazi i izlazi u i iz sustava.

Donelan (1977.) je primjetio da na stanje mora utječe trenje vjetra na površinu te je povezao fiziku valova s naprezanjem vjetra na površini. Razvio je jednostavan model prognoze valova temeljen na konceptu lokalne ravnoteže količine gibanja, a ne na ravnoteži energije. Prvi je uveo u analizu i kut otklona između smjera puhanja vjetra i smjera propagacije valova.

Proces generiranja, disipacije i međudjelovanja valova u dubokoj vodi prikazan je kroz tri generacije formulacije problema ovisno o stupnju parametrizacije procesa.

Schwab (1984.) je unaprijedio dotadašnji numerički okvir kako bi formulirao poluempirijski parametarski model, model prve generacije, u kojem je nelinearno međudjelovanje u potpunosti zanemareno. Predstavnici druge generacije modela su SHALWV (shallow-water wave) i DWAVE (deep-water wave) modeli (1981. i 1986.) koji su svojom strukturom vrlo slični WAM modelu – modelu treće generacije. Međusobno se razlikuju u tome što DWAVE ne uključuje trenje s dnom. Ono što ova dva modela opisuje kao modele druge, a ne treće generacije je njihov pristup parametrizaciji nelinearnog međudjelovanja koji je strogo ovisan o unaprijed definiranom spektralnom obliku.

Prema velikoj studiji usporedbe prve i druge generacije valnih modela objavljenoj 1985. od tima stručnjaka okupljenih pod imenom SWAMP group (Ocean wave modelling) u oba modela postojala su neka osnovna pojednostavljenja kojima su modeli gubili na realnosti u ekstremnim uvjetima (osobito kod nagle promjene polja vjetra).

Spomenutom studijom započela je treća era, era numeričkog modeliranja koju je označio razvoj treće generacije valnih modela u kojima je četverostruko međudjelovanje valova izraženo eksplicitno. Prototip modela treće generacije je WAM model generiranja oceanskih valova WAMDI grupe (1988.).

U svim navedenim modelima, postoje i druga ograničenja za primjenu u obalnim područjima, i to:

- nisu uključeni fizikalni procesi u plitkom području kao nelinearna valna interakcija (triad) i lom valova uslijed promjene dubine
- primjena eksplicitne numeričke sheme skupa je i zato neprikladna za praktičnu primjenu.

Godine 1998. razvijen je numerički model treće generacije za primjenu u obalnim područjima Simulating Waves Nearshore – SWAN. Razvoj valova u SWAN modelu temelji se na Eulerovoj formulaciji ravnotežne jednadžbe spektralnog diskretnog valnog djelovanja. Model diskretizira spektar u frekventnoj domeni i po smjerovima, a kinematičko ponašanje valova (uključujući djelovanje struja) opisano je linearnom teorijom površinskih gravitacijskih valova. SWAN uzima u obzir sljedeća fizikalna svojstva: širenje vala u vremenu i prostoru, shoaling, refrakciju uzrokovanu strujama i dubinom, promjenu frekvencije uslijed djelovanja: trostruku i četverostruku interakciju valova, površinski lom valova, trenje s dnom i lom uslijed promjene dubine, transmisiju kroz prepreke i refleksiju od prepreka i difrakciju. U ovom radu koristi se numerički model MIKE 21/SW (DHI, 2009.) koji koristi iste procesne jednadžbe kao i SWAN, a detaljno je opisan u poglavlju 2.

1.2 Pregled stanja područja

Modeliranje valova je složen proces koji se sastoji od primjene dva aspekta ljudskog znanja i to teorije, koja je često vezana s temeljnim principima drugih fundamentalnih znanosti i praktične primjene.

U posljednjih 60-tak godina lako je uočiti periode u kojima su napravljeni bazični pomaci u valnom modeliranju, praćeni periodima primjene i poboljšanjima malog reda veličine. Neizbježno, koraci kojima se napreduje sve su manji. Unutar sadašnje perspektive, otkriveni su osnovni dijelovi informacija, te se došlo mnogo bliže dobivanju zadovoljavajućih rezultata. Ipak, postavlja se pitanje, da li će se i kada pojaviti nova elementarna znanja. Do tada, alternativno je rješenje nastaviti s tehnološkim i inženjerskim poboljšanjima postojećih znanja na putu prema što boljim rezultatima.

U ovom poglavlju prikazana je općenito prihvaćena formulacija problema, detaljno je prikazan povijesni razvoj i trenutno stanje područja numeričkog modeliranja valova, te je, gdje je to moguće, dana i osnovna ideja budućeg smjera razvoja.

Slijedeći uobičajeni konceptualni model, razmatranje je podijeljeno u nekoliko segmenata. To uglavnom korespondira s dosadašnjom formulacijom problema u njegovim osnovnim jednadžbama i fizikalnom opisu.

Nakon prikaza formulacije problema, analizirani su redom slijedeći problemi:

- Generiranje valova vjetrom kao osnovni proces bez kojeg vjetrovni valovi ne bi postojali. Teoretske i praktične poteškoće koje stvara ovaj proces nemoguće je savladati, stoga je proces zapravo opisan intuitivno.
- Nelinearni procesi koji se javljaju uslijed valovanja, vjerojatno i najbolje opisani dio problema, inspirirani osnovama fizike i otkriveni prije više od 40 godina, teoretski su dobro definirani. Problem vezan uz njih je praktične prirode. Naime, još nije dostupno potrebno računsko vrijeme za adekvatan opis i vrednovanje.
- Površinski lom ili disipacija u dubokom, treći je temeljni fizikalni proces koji sudjeluje u razvoju vjetrovnih valova na otvorenom moru. Ono je i najmanje shvaćen dio razvoja valova i kombinira intuiciju i pragmatičan pristup i zapravo je bio i još uvijek je osnovni parametar koji regulira svaki valni model.
- U plitkom području, nelinearno međudjelovanje postaje aktivni subjekt teoretskih istraživanja, dan je sažetak dosadašnjih postignuća s očekivanjima u praktičnoj primijeni.
- Trenje s dnom opisuje interakciju i gubitak energije vjetrovnih valova u kontaktu s dnom. Sadrži niz različitih procesa, i iako trenje s dnom predstavlja najkorišteniji termin, značaj svakog pojedinog procesa ovisi o lokalnim karakteristikama dna.
- Konačno, numerika koja prezentira praktični opis i primijenu navedenih procesa. Diskretni opis mora koji se koristi u modeliranju vodi do niza problema kojima je potrebno optimizirati rješenje.

1.2.1 Formulacija problema

Za opis valnog modela u proizvoljnom slučaju, pretpostavlja se izdizanje površine kao zbroj velikog broja nezavisnih linearnih valnih komponenti. Time se valna prognoza temelji na prognozi svake od tih nezavisnih komponenti zasebno, odnosno energije spektra $E(f,\theta)$ svake komponente, pri čemu je f valna frekvencija i θ proizvoljni smjer svake pojedine komponente (slika 1-1). Budući je energija spektra promjenjiva u vremenu, t i prostoru, (x, y), korektan je zapis u obliku $E(f,\theta) = E(f,\theta;x,y,t)$.



Slika 1-1 Izdizanje površine kao zbroj niza nezavisnih linearnih valova [Holthuijsen]

Jednadžba energetske ravnoteže

Razvoj energije svake valne komponente (f, θ) može se odrediti integracijom jednadžbe razvoja energije uslijed napredovanja brzinom grupe u smjeru vala:

$$\frac{dE(f,\theta;x,y,t)}{dt} = S(f,\theta;x,y,t), \qquad (1-2)$$

gdje je lijeva strana jednadžbe brzina promjene energije valnog spektra, a desna strana jednadžbe predstavlja superpoziciju funkcija koje opisuju različite fizikalne fenomene obuhvaćene analizom, u obliku $S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$, (predstavlja izvore i ponore). U danom izrazu S_{in} predstavlja snagu koja u sustav dolazi od vjetra, S_{nl} opisuje nelinearni prijenos energije između samih valova (ovisno o području u kojem se nalazi uzima se u obzir *quadruplet* ili *triada*), S_{ds} disipaciju energije uslijed površinskog loma valova, S_{bot} disipaciju energije uslijed trenja s dnom i S_{surf} disipaciju valne energije uslijed loma valova uzrokovanog promjenom dubine.

Širenje valova, opisano lijevom stranom jednadžbe (1-2), uzima u obzir poznate utjecaje refrakcije, shoalinga, difrakcije i refleksije koji dominiraju promjenom valnog polja. Širenje valova predmet je znanstvenih istraživanja stoljećima. Opsežnu teoriju monokromatskih linearnih i nelinearnih valova dali su Airy (1845.) i Stokes (1847.), dok je nelinearne utjecaje specifične za plitko područje analizirao Boussinesq (1872.). Spektralnu analizu vjetrovnih valova uveli su Pierson i sur. (1955.) u cilju uzimanja u proračun iregularnosti morskih valova.

Konceptualno gledano, izrazom (1-2) dan Lagrangeov pristup je vrlo direktan budući da je u dubokom moru smjer širenja valova pravac ili velika kružnica. Naime, na velikoj (oceanskoj) skali, ravne linije potrebno je interpretirati kao velike kružnice (presjek zemaljske kugle i ravnina kroz njeno središte; najkraća udaljenost između dvije točke na Zemlji je ona mjerena duž kružnice). Smjer širenja valova u odgovarajućem sfernom koordinatnom sustavu polako se mijenja duž kružnice kako val putuje preko oceana (uslijed konvergencije meridijana prema polovima), pa se za sferno širenje ne može smjer valova smatrati konstantnim. Prema tome je jednadžbu (1-2) dovoljno integrirati samo po tim pravcima. Za neku predikcijsku točku, skup svih relevantnih valnih zraka (svih smjerova i frekvencija) je lepeza ravnih linija ili velikih kružnica sa središtem u toj točki (slika 1-2).

Integracija člana izvora ili ponora duž svake od ovih zraka ne predstavlja problem ako je poznata njegova veličina duž zrake. No, to nažalost nije slučaj, u svakoj točki duž zrake, član izvora ne ovisi samo o veličinama koje ga definiraju, nego i o cijelom dvodimenzionalnom spektru u toj točki, odnosno o valnim komponentama koje presjecaju zraku. Energija ovih drugih komponenti nije poznata, pa Lagrangovski pristup nije moguće upotrijebiti u proračunu. On je konceptualno atraktivan, ali za proračun je potreban drugačiji pristup. Na raspolaganju su dvije mogućnosti:

- korištenje drugačije formulacije koja izbjegava problem,
- pojednostavljenje člana izvora tako da ne ovisi o drugim valnim komponentama.



Slika 1-2 Skup relevantnih zraka u nekoj predikcijskoj točki [Holthuijsen]

Prva alternativa rješava se Eulerovim pristupom u kojem se spektar ne određuje samo u jednoj predikcijskoj točki nego u velikom broju točaka simultano s lokalnom jednadžbom energetske ravnoteže u svakoj od tih točaka. Ovaj pristup je temeljno gledano ispravan i koristi se u naprednom modeliranju valova (druga i treća generacija valnih modela). Druga alternativa je definiranje člana izvora tako da ovisi samo o valnim komponentama koje se mijenjaju duž zrake i vanjskim parametrima kao što je vjetar, ali ne i o ostalim valnim parametrima (valni model prve generacije – zanemareno nelinearno međudjelovanje valova). Ovo je jednostavno i ekonomično rješenje koje daje prihvatljive rezultate, ali s obzirom na mogućnosti današnjih računala više nije potrebno u primjeni pa se ovdje neće razmatrati. Također moguć je i hibridni pristup prema kojem se kombinira Lagrangeov pristup za širenje valova i Eulerov pristup za definiranje člana izvora.

Eulerova formulacija tretira energetsku ravnotežu valova na geografskoj mreži, ili u Kartezijevom koordinatnom sustavu (za manja područja) ili u longituda-latituda mreži (za veća područja). Za određivanje lokalne ravnoteže energije prema Eulerovom pristupu, pretpostavlja se jedna ćelija geografske mreže veličine Δx u *x*-smjeru i Δy u *y*-smjeru (slika 1-3). Jednadžba ravnoteže za promatranu prostorno fiksnu ćeliju, kao i za sve ostale u mreži, glasi:

promjena energije u fiksnoj ćeliji u jedinici vremena =

mrežni tok energije + lokalno generirana energija u jedinici vremena.



Slika 1-3 Pronos energije kroz jednu ćeliju pravilne mreže u Eulerovom pristupu [Holthuijsen]

Razlika energije na kraju i na početku intervala, može se pisati u obliku:

promjena energije u ćeliji =
$$\left(E(f, \theta; x, y, t)\Delta x\Delta y + \frac{\partial E(f, \theta; x, y, t)}{\partial t}\Delta x\Delta y\Delta t)\right)$$

$$-E(f, \theta; x, y, t)\Delta x\Delta y \quad (1-3)$$

$$= \frac{\partial E(f, \theta; x, y, t)}{\partial t}\Delta x\Delta y\Delta t$$

Mrežni unos energije u ćeliju tijekom intervala Δt u *x*-smjeru odgovara ulasku energije s lijeve strane ćelije (s brzinom $c_{g,x} = c_g \cos \theta$, po širini Δy) umanjenom za veličinu energije koja izlazi iz ćelije na desnoj strani (s veličinom koja se razvila na duljini Δx): unos energije u *x*-smjeru = $c_{g,x}E(f,\theta; x, y, t)\Delta y\Delta t$

$$-\left(c_{g,x}E(f,\theta;x,y,t) + \frac{\partial c_{g,x}E(f,\theta;x,y,t)}{\partial x}\Delta x\right)\Delta y\Delta t \qquad (1-4)$$
$$= -\frac{\partial c_{g,x}E(f,\theta;x,y,t)}{\partial x}\Delta x\Delta y\Delta t$$

Isto tako, unos energije u y-smjeru može se pisati u obliku:

unos energije u $y - \text{smjeru} = c_{g,y} E(f, \theta; x, y, t) \Delta x \Delta t$

$$-\left(c_{g,y}E(f,\theta;x,y,t) + \frac{\partial c_{g,y}E(f,\theta;x,y,t)}{\partial y}\Delta y\right)\Delta x\Delta t \qquad (1-5)$$
$$= -\frac{\partial c_{g,y}E(f,\theta;x,y,t)}{\partial y}\Delta x\Delta y\Delta t$$

gdje su $\frac{dx}{dt} = c_{g,x}$ i $\frac{dy}{dt} = c_{g,y}$ (pri čemu su $c_{g,x}$ i $c_{g,y}$ x i y komponente brzine grupe vala koji promatramo), a frekvencija i smjer su konstante (u dubokom).

Lokalno generirana energija unutar same ćelije tijekom vremenskog intervala Δt je lokalno generirana energija = $S(f, \theta; x, y, t)\Delta x\Delta y\Delta t$ (1-6) gdje član $S(f, \theta; x, y, t)$ predstavlja sve efekte generiranja valova vjetrom, nelinearnog međudjelovanja valova i disipacijske procese u jedinici vremena u jedinici prostora.

Prema tome ukupna promjena energija za ćeliju $\Delta x \Delta y$ u vremenu Δt definirana je izrazom

$$\frac{\partial}{\partial t}E(f,\theta;x,y,t)\Delta x\Delta y\Delta t + \frac{\partial c_{g,x}E(f,\theta;x,y,t)}{\partial x}\Delta x\Delta y\Delta t + \frac{\partial c_{g,y}E(f,\theta;x,y,t)}{\partial y}\Delta x\Delta y\Delta t = S(f,\theta;x,y,t)\Delta x\Delta y\Delta t$$
(1-7)

Dijeljenjem izraza (1-7) sa $\Delta x \Delta y \Delta t$ slijedi Eulerova jednadžba očuvanja spektralne energije za svaku valnu komponentu, za svaku ćeliju u svakom trenutku, koja ima oblik

$$\frac{\partial E(f,\theta;x,y,t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x}E(f,\theta;x,y,t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y}E(f,\theta;x,y,t)}{\partial y} = S(f,\theta;x,y,t).$$
(1-8)

U dubokom brzina širenja vala ne ovisi o x i y, pa slijedi

$$\frac{\partial E(f,\theta;x,y,t)}{\partial t} + c_{g,x} \frac{E(f,\theta;x,y,t)}{\partial x} + c_{g,y} \frac{E(f,\theta;x,y,t)}{\partial y} = S(f,\theta;x,y,t).$$
(1-9)

S matematičkog stajališta ova jednadžba ekvivalentna je jednadžbi razvoja energije duž zrake u dubokom (1-2). U obalnom području, kada dno utječe na duljinu i smjer širenja vala, ova jednakost više ne vrijedi.

Također, potrebno je napomenuti da se za veća područja, za globalne modele, kada se preporuča korištenje sfernog koordinatnog sustava ista jednadžba može pisati u obliku

$$\frac{\partial E(f,\theta;\lambda,\varphi,t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,\lambda} E(f,\theta;\lambda,\varphi,t)}{\partial x} + \frac{1}{\cos\varphi} \frac{\partial c_{g,\varphi} \cos\varphi E(f,\theta;\lambda,\varphi,t)}{\partial \varphi} + \frac{\partial c_{\theta} E(f,\theta;\lambda,\varphi,t)}{\partial \theta} = S(f,\theta;\lambda,\varphi,t)$$
(1-10)

gdje su λ i φ longituda i latituda, $c_{g,\lambda} = (c_g \sin \theta)/(R \cos \varphi)$ i $c_{g,\varphi} = (c_g \cos \theta)/R$ komponente brzine grupe u smjeru longitude i latitude i $c_{\theta} = (c_g \sin \theta \tan \varphi)/R$ brzina rotacije, a *R* je radijus Zemlje.

Prikazani Eulerov pristup modeliranja valova zapravo je definiran samo jednom jednadžbom, jednadžbom očuvanja energije (1-9) ili (1-10), no integracija ove jednadžbe u prostoru i vremenu uključuje veliki broj točaka u prostoru i vremenu, te veliki broj valnih komponenti. Jednadžbu je potrebno riješiti za svaku kombinaciju tih točaka i komponenti.

1.2.2 Generiranje valova vjetrom

Kombinacija mjerenja iz 1970-ih i teoretskih radova koji opisuju mehanizam koji generira valove unutar kritičnog sloja započetih 1950-ih rezultirala je parametrizacijom funkcije izvora od vjetra koja daje dobre rezultate u operativnim valnim modelima. Zajedno s realističnim prikazom područja velikog valnog broja valnog spektra, ova parametrizacija ima potencijala da dovede do realnog opisa prijenosa energije s vjetra na valove. Međudjelovanje valova i atmosfere rezultiralo je unapređenjem prognostičkih vještina za vjetar i valove (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts).

Mehanizam generiranja valova vjetrom

Ovdje je ukratko prikazan usvojeni mehanizam generiranja valova vjetrom radi lakšeg praćenja povijesnog razvoja i kasnijih analiza.

Općenito, vjetrovni valovi generiraju se kroz tri faze. U trenutku kada vjetar počinje puhati nad morem, kontaktna površina je ravna i mirna. U prvoj fazi, fazi početne (inicijalne) generacije javlja se rezonantni mehanizam kad turbulentno strujanje zraka inducira pulsirajući tlak na morsku površinu. Uslijed toga nastaju valovi na površini vode iste frekvencije kakvu imaju i pulsacije tlaka, pa nabori zbog rezonancije i dalje rastu (slika 1-4.1). Zatim slijedi druga faza, faza valovitog strujanja zraka nad valnim profilom bez odvajanja strujnice. Energija vjetra se na valove prenosi preko vrtloga zraka u dolu vala i preko rezultirajućeg polja tlaka koje uzrokuje porast valne visine stvarajući slabo more (slika 1-4.2). U posljednjoj fazi dolazi do lomljenja valova, kad se valovi malih valnih dužina lome na grebenima dugih valova. u toj fazi nastaju najveći valovi. Kratki val koji se slomi na dugom dodaje impuls od svoje prebačene mase kinetičkoj energiji orbitalnog gibanja vodnih čestica dugog vala. Povećanjem energije dugog vala raste mu i valna visina, pa se tako valna energija prenosi s kratkih na duge valove (slika 1-4.3).



(1-Inicijalna generacija, 2-Valovito strujanje zraka, 3-Lom valova)

Razumijevanje razvoja vjetrovnih valova vrlo je zahtjevan zadatak. S teoretskog stajališta potrebno je uočiti da se radi o izuzetno teškom problemu koji uključuje modeliranje turbulentnog strujanja zraka iznad površine mora koja se mijenja u prostoru i vremenu.

Teorije prijenosa energije vjetra na valove

Helmholtzova teorija

Teorija se temelji na razmatranju oscilacija uzdizanja kontaktne površine između dva fluida različitih gustoća mase ρ_1 i ρ_2 te brzine kretanja u_1 i u_2 . Kontaktna površina između dva fluida pri tom se giba brzinom c, a razmak između dva grebena brijega

kontaktne površine neka je označen sa *L*. Oscilacija inducirana na međugranici poprima oblik vlaka valova, tako da je:

$$\rho_1(u_1 - c)^2 + \rho_2(u_2 - c)^2 = \binom{g}{k}(\rho_2 - \rho_1)$$
(1-11)

gdje je *g* ubrzanje sile teže, a $k = \frac{2\pi}{L}$ valni broj. U slučaju da fluidi miruju, $u_1 = u_2 = 0$, izraz (1-11) poprima oblik

$$c^{2} = \frac{g}{k} \left(\frac{1 - \frac{\rho_{1}}{\rho_{2}}}{1 + \frac{\rho_{1}}{\rho_{2}}} \right).$$
(1-12)

Uz pretpostavku da je gornji fluid zrak, a donji voda izraz (1-12) poprima oblik $c^2 = \frac{g}{k}$, širenja vala izveden prema linearnoj teoriji.

Doprinos Helmoltzove teorije značajan je u području definiranja nekih graničnih vrijednosti.

Jednadžba (1-11) može se pisati u obliku

$$c = \frac{\rho_2 u_2 + \rho_1 u_1}{\rho_1 + \rho_2} \pm \sqrt{\frac{g}{k} \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}\right) - \left(\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + \rho_2)^2}\right)}$$
(1-13)

Iz gornjeg oblika može se odrediti uvjet nestabilnosti razvoja valova kada je izraz pod korijenom manji od nula. Za pretpostavljenu kontaktnu površinu između vode i zraka,

uvjet nestabilnosti se može odrediti kao $\frac{\sqrt{g_k}}{u} < \frac{1}{28}$. Odnosno, dokle god je ispunjen gornji uvjet valovi su nestabilni i rastu po visini i periodu.

Također, može se pokazati da je najmanja brzina propagacije kapilarnih valova 23,2cm/s što odgovara dužini valova od 1,7cm i periodu 0,073s. Ukoliko se uključi i površinski napon, prema Kelvinu, valovi će biti nestabilni ukoliko je brzina vjetra >6,5m/s. Ova brzina zove se i kritična brzina vjetra za generiranje gravitacijskih valova. Prema mjerenjima, u prirodi se kritična brzina vjetra nalazi u intervalu od 4 do 6m/s. Do te brzine strujanje vjetra iznad vode je laminarno, dok se ukoliko se poveća brzina vjetra razvija turbulencija i površina postaje hidrodinamički hrapava, te se amplitude valova povećavaju u vremenu i prostoru.

Jeffereysova teorija

Jeffreysova teorija se temelji na nužnosti postojanja hidrodinamički hrapave površine mora. Čestice mora koje se nalaze u zavjetrini, odnosno u području manje brzine vjetra, bit će pod djelovanjem manjeg normalnog tlaka za razliku od onih na vjetrovnoj strani na koje će djelovati veći normalni tlak. Upravo ta razlika u tlakovima omogućuje prijenos energije sa vjetra na valove sve do trenutka kada brzina širenja valova ne dostigne brzinu vjetra. Tada valovi dosižu najveću visinu i uspostavlja se stacionarno stanje valnog polja. Minimalna brzina vjetra potrebna da se energija iz vjetra počne prenositi na valove, prema ovoj teoriji, iznosi cca 1m/s.

Teorija Svedrupa i Munka

Prema ovoj teoriji uzima se u obzir i prijenos energije i preko tangencijalnih napona, a ne samo normalnih. Valna energija može rasti samo u slučaju kada je suma energije dobivene preko normalnih i tangencijalnih napona veća od energije koja se disipira preko viskoznosti. U prvim trenucima razvoja valova, energija se s vjetra isključivo prenosi preko normalnog tlaka, a nakon što starost valova dostigne veličinu $c_{u} > 0,37$, prijenos energije preko tangencijalnih napona postaje dominantan. Normalni naponi dominantni su samo u kratkom, početnom, vremenu procesa generiranja valova.

U uvjetima kada je c/u = 1, energija se s vjetra prenosi preko tangencijalnih napona, ali se dio energije gubi preko normalnih napona. Stanje potpuno razvijenog mora, prema Breitschneideru, postiže se u trenutku kada je c/u = 1,95.

Philipsova teorija

Philips (1957.) prvi uvodi u razmatranje promjenu brzine vjetra nad površinom mora tijekom vremena. Svoju teoriju bazirao je na postavci o slučajnim fluktuacijama brzine vjetra oko neke srednje brzine koje povlače promijenu pritisaka zbog koje se generiraju prvi valovi u cjelokupnom procesu generiranja valova vjetrom.

Milesova teorija

U toku generiranja valova, profil brzina vjetra iznad površine mora se mijenja. Brzina vjetra na bregovima nastalih valova je veća, dok je u dolovima manja. To rezultira povećanjem pritiska na brijegu valova, a smanjenjem u dolu te dolazi do porasta valova. Na određenom mjestu vertikalne raspodjele brzine, brzina će biti jednaka nuli. Udaljenost od mirne površine mora do te točke je visina kritičnog sloja unutar kojeg će brzina vjetra biti reverzibilna, odnosno smjer kretanja čestica vjetra će biti suprotan u odnosu na smjer širenja vala. Kao posljedica toga stvara se tzv- vortex koji oduzima energiju vjetru i predaje je valnom polju.

Phillips je razmatrao rezonanciju kontaktne površine i turbulentnog strujanja zraka, dok je Miles razmatrao rezonanciju između valovima uzrokovanog polja tlaka i slobodne površine. Ova dva mehanizma mogu se nadopunjavati i to, u prvoj fazi generiranja valova dominira rezonantna izgradnja valova sa linearnim porastom energije prema Philipsovoj teoriji, a u kasnijim fazama međusobno djelovanje vjetra i vala tvori eksponencijalni porast energije pa se fizikalni procesi objašnjavaju Milesovom teorijom.

Pri tome je Milesov mehanizam više obećavao jer je podrazumijevao eksponencijalni porast ovisan o omjeru gustoće zraka i vode. Osnovni razlog za kontroverze u Milesovoj teoriji bilo je pojednostavljenje problema uslijed kvazilaminarnog pristupa koji pretpostavlja da je strujanje zraka bezviskozno i da turbulencija zraka nema nikakvog utjecaja osim u graničnom sloju. Drugi razlog je taj, što je Miles zanemario nelinearne procese. Također, provedeni eksperimenti, (Dobson, 1971.), dali su veličine prijenosa energije sa vjetra na valove reda veličine veće od pretpostavljene prema Milesu. Novija mjerenja (Snyder, 1974. i 1981., Hasselman i Bosenberg, 1991.) pokazala su slaganje reda veličine s Milesovom teorijom, iako teorija i dalje predviđa manji prijenos energije

od mjerenih vrijednosti, posebno kod relativno niskofrekventnih valova s faznom brzinom približno jednakom brzini vjetra na visini 10 m iznad površine.

Bilo je nekoliko pokušaja svladavanja ovih nedostataka usrednjenjem numeričkog modela turbulentnog graničnog sloja nad pokretnom kontaktnom površinom. Uz prikladne pretpostavke interakcija valovima induciranog strujanja s usrednjenim strujanjem i turbulencija graničnog sloja mogu biti eksplicitno simulirani (Gent i Taylor, 1976.; Makin i Chalikov, 1979.; Riley i sur., 1982.; Jacobs, 1987.; Chalikov i Makin, 1991., Chalikov i Belevich, 1993.). Ovaj pristup razmatra direktne utjecaje turbulencije malog reda veličine na rast valova. Zanimljivo je da je rezultirajuća difuzija momenta tada toliko velika da je osnovni Milesov mehanizam u tom slučaju nedjelotvoran. Također, kada se valovi šire brže od vjetra ili kada vjetar puše u suprotnom smjeru od širenja valova ovaj pristup daje zamjetno prigušenje valova, kojeg u Milesovoj teoriji nema. Ovaj model turbulencije oslanja se na analogiju s molekularnim procesima. Van Duin i Janssen (1992.) su pokazali da ovaj pristup nije prihvatljiv kod valova nižih frekvencija, te je u tom slučaju potreban drugačiji pristup.

Nikolayeva i Tsimring (1986.) analizirali su utjecaj udara vjetra na generiranje valova i ustanovili znatno poboljšanje u prijenosu energije, osobito kod dugih valova kojima se fazna brzina može usporediti s brzinom vjetra na visini 10m iznad površine.

U toku generiranja valova, profil brzina vjetra iznad površine mora se mijenja. Brzina vjetra na bregovima nastalih valova bit će veća, a u dolovima manja što će rezultirati povećanjem pritiska na brijegu valova, a smanjenjem u dolu te će samim time vremenski porast valova biti brz, te rasti po eksponencijalnom zakonu. Na određenom mjestu vertikalne raspodjele brzine, brzina će biti jednaka nuli. Udaljenost od mirne površine mora do te točke je tzv. visina kritičnog sloja unutar kojeg će brzina vjetra biti reverzibilna, odnosno smjer vjetra će relativno u odnosu na brzinu širenja vala biti suprotan. Kao posljedica toga stvara se sloj koji oduzima energiju vjetru i predaje je valnom polju. Belcher i Hunt (1993.) otkrili su dva sloja u strujanju zraka nad valovima. Turbulencija u sloju bližem površini, koji oni nazivaju inner region, u ravnoteži je s lokalnim gradijentom brzine. Iznad tog sloja formira se drugi sloj, outer region, u kojem se turbulencija ne može zanemariti. Ovaj mehanizam je srodan Jeffreyevoj hipotezi zaštićenosti. Prema Belcheru i Huntu kretanje valova je u usporedbi s brzinom vjetra sporo. Valovi od interesa u modelima prognoze valova su oni s brzinom istog reda veličine brzini vjetra, no za njih ova teorija ne vrijedi. Njihov pristup unaprijedio je Mastenbroek (1996.) u sklopu modela drugog reda turbulencije zraka.

(1-14)

Opis problema

Član izvora energije S_{in} (1-2) definiran je prema rezultatima istraživanja u kojima je pokazano da intenzitet valnog generiranja ovisi o vremenu proteklom od inicijalizacije vala prema zakonu:

 $S_{in}(f,\theta) = \gamma E(f,\theta)$ gdje je: $f = \omega/2\pi$ valna frekvencija, γ intenzitet valnog generiranja (slika 1-5).



Slika 1-5 Ulazni član utjecaja vjetra za JONSWAP spektar u dubokom (definirano pomoću formulacije inicijalne generacije prema Cavaleri i Malanotte-Rizzoli, 1981., i modelom Miles-a, 1957., za H_{m0} =3,5m, T_p =7s i U₁₀=20m/s) [Holthuijsen]

Intenzitet valnog generiranja definiran je izrazom predloženim od Janssena:

$$\gamma = \omega \frac{\rho_Z}{\rho_V} \left(\frac{1,2}{\kappa^2} \mu \ln^4 \mu \right) \left[\frac{u_*}{c} \cos(\theta - \theta_w) \right]^2$$
(1-15)

gdje su: ρ_Z , ρ_V gustoće zraka i vode, κ Karmanova konstanta, θ_w smjer vjetra, θ smjer vala, u_* brzinsko trenja od vjetra, $c=\omega/k$ fazna brzina vala, μ bezdimenzionalna kritična visina vala definirana izrazom $\mu=kz_0\exp(\kappa/m)$, z_0 hrapavost morske površine inducirana djelovanjem vjetra.

Parametar z_0 definiran je odnosom:

$$z_{0} = \frac{z_{CHARNOCK} u_{*}^{2}}{g} \left(1 - \frac{\tau_{w}}{\rho_{Z} u_{*}^{2}} \right)^{-1/2}$$
(1-16)

gdje je: τ_w naprezanje na morskoj površini inducirano djelovanjem vjetra, $z_{CHARNOCK}$ modelska konstanta.

Zaključak

Ukratko, razvoj tijekom posljednjih 40 godina može se sažeti kako slijedi. Milesova kvazilaminarna teorija bila je prvi model koji je dao vjerodostojno objašnjenje generiranja vjetrovnih valova. Zbog zanemarivanja turbulencije kod strujanja izazvanog valovima ovaj kvazilaminarni model kritiziran je kao nerealističan. No, isto tako su kritizirani i prvi pokušaji uvođenja utjecaja turbulencije u višeslojnim modelima, uglavnom zbog vrtloga u vanjskom sloju zraka koji su prespori da prenesu značajnu količinu energije tokom gibanja valova. Prema modelima velike distorzije, poput Belcher i Hunt ili Mastenbroek modela, mehanizam kritičnog sloja je relevantan samo kod izrazito brzih valova. U novije vrijeme javili su se i dokazi da Belcher i Hunt pristup

precijenjuje utjecaje vrtloga na strujanje uzrokovano valovima. Sullivan i sur. (2000.) su analizirali generiranje vjetrovnih valova u kontekstu rješavanja numeričkog modela samih vrtloga. Premda je Reynoldsov broj u usporedbi s prirodom bio reda veličine manji, utvrđen je direktan dokaz postojanja kritičnog sloja. Sljedeći ideju značajne distorzije Belcher i Hunt tvrde da su veliki vrtlozi prespori za prijenos značajne količine energije tijekom jednog valnog perioda. Nadalje, danas postoje i direktniji dokazi postojanja i važnosti mehanizma kritičnog sloja sa promatranja in-situ (Hristov i sur., 2003.).

Za zadani profil vjetra kvazilinearna teorija je prilično uspješna u predviđanju razvoja valova generiranih vjetrom, ali ignorira mogućnost promjene profila vjetra tijekom razvoja valova. Prijenos energije s vjetra na valove može biti toliko velik da odgovarajuća naprezanja izazvana vjetrom dostignu znatan udio u turbulentnim naprezanjima (Snyder i sur., 1981.). Također, prijenos energije sa zraka na valove može biti i pod utjecajem stanja mora. Promatranja su to i potvrdila. Mjerenja, (npr. Donelan, 1982.; Smith i sur., 1992.; Drennan i sur., 1999.; Oost i sur. 2002.) su pokazala da koef. otpora ovisi o stanju mora kroz starost valova. Teoriju međudjelovanja vjetra i valova razvio je Janssen (1982.). Kvazilinearna teorija generiranja valova vjetrom prati spori razvoj stanja mora i njegove utjecaje na profil vjetra. U svakom pojedinom trenutku uočena ovisnost strujanja zraka i stanja mora može se objasniti Milesovom teorijom. Rezultirajuća parametrizacija hrapavosti izražena preko naprezanja usljed valova daje zadovoljavajuće poklapanje sa uočenom hrapavosti (Janssen, 1992.).

Uključivanjem prognostičkog valnog modela u sustav vremenskih prognoza, moguće je u svakom vremenskom koraku odrediti koliko se energije iz zraka prenosi na valove. Proširena istraživanja ECMWF-a su pokazala da prijenos energije ovisan o stanju mora daje poboljšane rezultate u prognozi i valova i vjetra (Janssen, 2004.).

Bez obzira na relativno uspješnu kvazilinearnu teoriju još uvijek se ne može reći da je problem generiranja valova vjetrom i odgovora valova na vjetar dobro shvaćen, posebno kod kratkih valova, gdje trenutno nema dokaza o utjecaju starosti valova. Naime, kvazilinearni pristup pretpostavlja da su kratki valovi linearni, iako su oni relativno strmi. Zbog toga, nelinearni proces odvajanja strujanja zraka, slično Jeffreyesovim razmatranjima (1924., 1925.), može imati utjecaja kod prijenosa energije sa zraka na valove, što može dovesti do alternativnog objašnjenja ovisnosti stanja mora o otporu iznad valova (Makin i Kudryavtsev, 2002.). To objašnjenje zahtjeva da se značajni dio otpora definira odvajanjem graničnog sloja zraka nad grebenom dominantnog vala.

Milesova teorija izvedena je za jednosmjerne, monokromatske valove. Pretpostavljala je da su međudjelovanja vjetra i valova dovoljno linearna da se utjecaj vjetra na svaku spektralnu komponentu može promatrati neovisno. To je posebno istraživao Tsiming (1983.) koji je promatrao međudjelovanje dva vala i strujanje zraka, što je zapravo najjednostavniji slučaj valne grupe. Rezultirajući rast valova pojedine spektralne komponente sada ovisi o prisutnosti drugih komponenti, no s numeričkog stajališta taj utjecaj je mali, obzirom da je proporcionalan omjeru gustoće zraka i mora i kvadratu valnog spektra.

U prethodnim razmatranjima analizirao se utjecaj turbulencije zraka u vezi s fizikom procesa međudjelovanja vjetra i površine mora. Kada se fizikalni smisao procesa prebaci u izraze za praktičnu primjenu u modeliranju valova, pretpostavlja se konstantan vjetar unutar svakog vremenskog koraka u svakoj točki postupka numeričke integracije. Uobičajeno je pretpostaviti da je prijenos energije s vjetra na valove u funkciji razlike nominalne brzine vjetra i brzine širenja vala. Kada bi ova ovisnost bila linearna tada oscilacija brzine vjetra u odnosu na srednju vrijednost ne bi imala utjecaja, ali to nije slučaj. Tako za brzinu vala znatno veću od brzine vjetra praktički nema interakcije između vjetra i valova, dakle ovisnost je potpuno nedefinirana. Ako se pak promatra val brzine slične brzini vjetra, zanimljivo je da će vjetar u smjeru širenja valova potaknuti razvoj valova, no vjetar suprotnog smjera neće izazvati smanjenje porasta valova. Valovi u razvoju ponašaju se kao ispravljači (Abdalla i Cavaleri, 2002.) i zato udari vjetra mogu imati znatan utjecaj na razvoj valova. Posljedice su, kada valovi dostignu zrelu fazu, nastavljaju rasti, iako smanjenim prirastom, do granice znatno iznad granice potpuno razvijenog mora dobivene u stacionarnim uvjetima vjetra. Isto tako porast valne visine ovisi i o korelaciji udara vjetra i s vremenskim korakom proračuna. Ako su udari vjetra u razmacima kraćim ili jednakim koraku integracije (slično vrijedi i u prostoru) tada je krivulja rasta valne visine glatka, u suprotnom javljaju se veće ili manje oscilacije. U praktičnoj primijeni ovaj udar vjetra može se uzeti u proračun prateći proceduru Janssena (2004.). No, oscilacije značajne valne visine uslijed koherencije u varijabilnosti vjetra nisu determinističke i trenutno nisu uključene u operativne modele. To uključuje određeni stupanj slučajnosti u uspoređivanju promatrane i modelirane vrijednosti značajne valne visine. Zajedno sa nedostatkom informacija o udarima vjetra u ulaznom polju vjetra, to komplicira potvrdu prognostičkih valnih polja. Postoje dobri teoretski i praktični razlozi za postojanje ovog utjecaja, no nedostaje kvantifikacija stvarne relevantnosti.

1.2.3 Nelinearno međudjelovanje valova u diskretnim valnim modelima

Nelinearno međudjelovanje valova u diskretnim valnim modelima u proračun se uzimaju po modelu međudjelovanja 4 vala (engl. *quadruplet*). Danas je uobičajeno da rezonantna nelinearna međudjelovanja između skupa 4 vala imaju važnu ulogu u razvoju energetskog spektra slobodnih površinskih gravitacijskih valova. To je prvi puta uočeno u sklopu JONSWAP projekta (Hasselmann i sur. 1973.). Opisano je i diskutirano između ostalog i u Phillips (1981.), Resio i Perrie (1991.), Zoung i van Vledder (1993.) i Ressio i sur. (2001.). Ovdje je dan zbirni prikaz stanja područja u razumijevanju i modeliranju nelinearnog međudjelovanja valova.

Opis problema

Nelinearno valno međudjelovanje najlakše je opisati ako se zamisli veliki bazen konstantne dubine (slika 1-6) u kojem iz dva različita ugla generiramo valove različitih frekvencija i smjerova. Na taj način formira se sustav koji ima svoj smjer, duljinu i brzinu, pa samim time i svoj valni broj, k. Ako na ta dva vala naiđe treći val iste duljine, brzine i smjera kao rezultantni od prethodna dva doći će do njihovog međudjelovanja koje se naziva triada (triad wave-wave interaction). Pri tome dolazi do preraspodjele energije između valova, ali ukupna energija sve tri komponente u svakoj točki ostaje ista. Opisana situacija javlja se samo u plitkom.



Slika 1-6 Triad - valno međudjelovanje [Holthuijsen]

U dubokom može doći do međudjelovanja između dva para valova ako se poklope valni brojevi i frekvencije njihovih rezultanti (slika 1-7). Tada će doći do prijenosa energije sa jednog para na drugi i to međudjelovanje zovemo quadruplet (*quadruplet wave-wave interaction*). Ponovno treba naglasiti da se uslijed quadrupleta energija nad spektrom samo preraspodjeljuje, ne gubi se niti u sustav ne ulazi nova energija (slika 1-8).



Slika 1-7 Quadruplet valno međudjelovanje (u dubokom) [Holthuijsen]

Osnovna jednadžba koja opisuje ovaj proces je Boltzmanov integral (Hasselmann, 1962. i Zakharov, 1968.). Hasselmann (1962., 1963.) je razvio teoretski okvir za nelinearno međudjelovanje valova u uvjetima homogenog mora konstantne dubine. Formulirao je integralni izraz za izražunavanje ovog međudjelovanja poznat kao Boltzmanov integral površinskih gravitacijskih valova.



Slika 1-8 Ulazni član međudjelovanja za JONSWAP spektar u dubokom moru (definirano WRT (Webb, Tracy, Resio, 1982.) tehnikom van Vledder 2006., za H_s =3,5m, T_p =7s) [Holthuijsen]

Hasselmann je ustanovio da skup od 4 vala (quadruplet) razmjenjuje energiju (slika 1-7) kada su zadovoljeni sljedeći uvjeti rezonancije $\vec{k_1} + \vec{k_2} = \vec{k_3} + \vec{k_4}$ i $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4$, pri čemu je ω_i kutna frekvencija, a $\vec{k_i}$ vektor valnog broja (i = 1,...,4). Linearna disperzija dana je izrazom $\omega^2 = gk \tanh(kh)$ što se u dubokom može pisati $\omega^2 = gk$, pri čemu je g gravitacijsko ubrzanje, a h dubina.

Član S_{nl} koji u numeričkim modelima opisuje prijenos energije između valova egzaktno je određen Boltzmannovim izrazom (Hasselmann, 1962.)

$$S_{nl4}(\vec{k}_4) = \int_{d\vec{k}_2} \int_{d\vec{k}_1} T_1(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_4) E(\vec{k}_1) E(\vec{k}_2) E(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_4) d\vec{k}_1 d\vec{k}_2 - E(\vec{k}_4) \int_{d\vec{k}_2} \int_{d\vec{k}_1} T_2(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_4) E(\vec{k}_1) E(\vec{k}_2) d\vec{k}_1 d\vec{k}_2$$
(1-17)

gdje su T_1 i T_2 koeficijenti prijenosa, izuzetno složene funkcije ovisne o vektorima valnih brojeva (slika 1-7). Pri tome u gornjem izrazu prvi integral predstavlja "pasivni" dio međudjelovanja (nezavisan o gustoći energije $E(\vec{k}_4)$), dok drugi integral predstavlja "aktivni" dio međudjelovanja. Energija valne komponente \vec{k}_4 ovisno o odnosu aktivnog i pasivnog dijela raste ili pada. Prema tome val opisan valnim brojem \vec{k}_4 uzima energiju iz sustava kroz pasivni dio, a predaje ga sustavu kroz aktivni dio.

Potpuno rješavanje Boltzmannovog integrala zbog svoje složenosti zahtijeva prilično vremena, unatoč svim naporima numeričke optimizacije (Snyder i sur., 1993.; Lin i Perrie, 1998.). Da bi se Boltzmannov integral koristio u numeričkom modelu, provodi se za treću generaciju valnih modela (WAM-WAMDI group, 1998.; WAVEWATCH – Tolmann, 1991., 2002.; TOMAWAC – Benoit i sur., 1997.; SWAN – Booji i sur., 1999.; CREST – Ardhuin i sur., 2001., MIKE21/SW – DHI, 2009.) uobičajena parametrizacija DIA (Discrete Interaction Approximation) (Hasselmann i sur., 1985.). DIA čuva samo neka, ali važna svojstva potpunog rješenja, kao što su sporo prizemljenje vršne frekvencije i stabilizacija oblika spektra tijekom razvoja valova. Primarno je DIA razvijena za duboku vodu, no za potrebe modela WAM (WAve prediction Model) uvedena je tehnika skaliranja za određivanje nelinearnog međudjelovanja valova za

proizvoljnu dubinu (Herterich i Hasselmann, 1980.). Ovom tehnikom član izvora za konačnu dubinu jednostavno se odredi množenjem dubokovodnog člana izvora konstantnim faktorom. Taj faktor je funkcija relativne dubine $\overline{k}h$, gdje je \overline{k} srednja vrijednost valnog broja valnog spektra. Ova jednostavna modifikacija izložena je nizu nedostataka u uvjetima plitkog područja, te su razvijene novije metode koje konačnu dubinu uzimaju na potpuniji način (Van Vledder, 2001.).

Janssen i Onorato (2007.) su prikazali detaljnu analizu primjene Zakharove jednadžbe u prijelaznom području. Ustanovili su da za $kh \approx 1,363$ veličina nelinearnog prijenosa energije postaje vrlo mala što je u kontradikciji s ranijim spoznajama (Heterich i Hasselmann, 1980. i Resio i sur., 2001.). Također ustanovili su da spomenuto jednostavno skaliranje dubokovodnog nelinearnog prijenosa nije korektno jer utječe i na oblik prijenosa. Van Vledder (2006.) je zaključio da to vrijedi i za Boltzmannovu jednadžbu. Mali nelinearni prijenos u prijelaznom području ima za posljedicu spuštanje vršne frekvencije, stoga je potrebno provesti daljnja istraživanja.

Razvoj metoda proračuna

Razvojem metode DIA djelomično je rješeno ograničenje egzaktnog rješenja, no iskustvo je pokazalo niz nedostataka te metode koja koče daljnji razvoj modela 3. generacije. Konkretno, nedostaci metode pokriveni su poboljšanjem drugih članova izvora. Zapravo se javlja dvojba, da li imati brzu i netočnu metodu DIA ili točnu i vremenski zahtjevnu egzaktnu metodu. Očigledno postoji potreba za računskom metodom koja bi bila operativno isplativa i dovoljno točna za primijenu u računalnim modelima 3. generacije. U razvoju takvih metoda bilo je raznih pokušaja, a napredak je postignut u 4 smjera.

Prvo, predložena su proširenja DIA metode dodavanjem više konfiguracija valnih brojeva u međusonoj interakciji (Van Vledder, 2001.; Haskimoto i Kawaguchi, 2001.; Tolman, 2004.). Ovi pokušaji su obečavajući, no još nisu uspješni u smislu opće primjene. Razlog je što se svaka od ovih tzv. višestrukih DIA metoda razvija za specifični skup testnih spektara. Potrebno je napomenuti da su alternativne DIA metode razvijali i drugi autori uglavnom u smislu povećanja brzine uz istu točnost, ali opet za manje podgrupe u kojima su po dva valna vektora međusobno jednaka (Abdalla i Ozhan, 1993.; Komatsu, 1996.; Polnikov i Farina, 2002.).

Drugo, razvoj je usmjeren u smjeru kretanja od egzaktne metode i pojednostavljenjima i/ili ograničenjima prostora integracije kod rješavanja Boltzmannovog integrala. Ove metode mogu smanjiti radno opterećenje kombinacijom pametno odabranih metoda integracije, grubljim metodama interpoplacije i filtriranjem nebitnih djelova područja integracije. Ovisno o određivanju konačnog sustava jednadžbi i načinu tretiranja singulariteta definiraju se slijedeće grupe egzaktnih metoda:

- EXACT-NL (Hasselmann i Hasselmann, 1981., 1985.; Van Vledder i Weber, 1988.; Van Vledder i Holthuijsen, 1993.)
- WRT metoda (Webb, 1978.; Tracy i Resio, 1982.; Resio i Perrie, 1991.; Van Vledder, 2006.), na temelju koje je razvijena reducirana aproksimacija (RIA) (Lin i Perrie, 1998.)
- RIAM metoda (Masuda, 1980.; Polnikov, 1997., Hashimoto i sur., 1998.)
- Lavrenov algoritam (2001.) temelji se na numeričkoj integraciji visoke preciznosti.

Svaki od navedenih pristupa nekom metodom rješava Boltzmannov integral. Razlika je u primijenjenoj metodi transformacije i u metodi numeričke integracije. Trenutno nije u potpunosti objašnjeno koja od ovih metoda daje najbolje rezultate u smislu točnosti i računalnih zahtjeva. Stoga je potrebna objektivna komparacija između različitih metoda kako bi se potvrdile ili eliminirale njihove primjene.

Resio i Pierre (2006.) uveli su dvostruku hibridnu metodu, u kojoj se spektar rastavlja na glavni dio koji pokriva osnovni oblik spektra i za koji se nelinearni prijenos računa WRT metodom i preostali dio za koji se računa aproksimativni korekcijski član. Preliminarni rezultati su obećavajući no potrebna je daljnja verifikacija metode.

Treći pristup se temelji na neuralnim mrežama. Tolman i Krasnopolsky (2004.) su prikazali metodu koja se temelji na neuralnim mrežama. Pokazalo se da ovaj pristup daje stabilan razvoj valova kod integracije u modelu. No, potrebno je još mnogo istraživačkog rada prije nego bi ovaj pristup postao općenito primijenjiv u operativnim modelima.

Četvrti pristup obuhvaća difuzijske operatore (Zakharov i Pushkarev, 1999.; Jenkins i Phillips, 2001.; Puskharev i sur., 2004.). Neka svojstva ovih aproksimacija objavio je Polnikov (2002.) i ustanovio povezanost difuzijske aproksimacije i egzaktnog rješenja integrala. No ove aproksimacije općenito ne daju posebno točne rezultate ukupnog integrala i moraju se pojedinačno definirati kako bi pokrile svaki od različitih spektralnih oblika. Iako zanimljivo zbog računske jednostavnosti, to nije dovoljno fleksibilno za primijenu u diskretnim spektralnim valnim modelima, budući koeficijent proporcionalnosti treba određivati po klasama spektara koji se razmatraju.

Do sada nisu provedene objektivne usporedbe koje bi utvrdile najbolju metodu proračuna nelinearnog međudjelovanja valova (po točnosti i lakoći primijene), no napravljen je niz pokušaja međusobne usporedbe raznih metoda.

Lavrenov (2001., 2003.) je usporedio svoju metodu i metode Hasselmanna, Polnikova, Masuda i Resia, i ustvrdio da njegova metoda daje točne rezultate uz relativno male zahtjeve na proračun. Komparativna studija različitih aproksimacija Boltzmannovog integrala napravljena je kroz niz radova (Polnikov i Farina, 2002.; Polnikov, 2003.). Korištenje definirane mjere pogreške pokazalo je da je DIA metoda najbolja među ostalim teoretskim aproksimacijama, difuzijskom aproksimacijom i reduciranom integracijskom aproksimacijom. Usporedba rezultata dobivenih nekim od ovih metoda dana je za nekoliko valnih spektara u dubokom u radu Benoit (2005.).

Uglavnom su sve usporedbe provedene za mali skup tzv. akademskih spektara, što ne garantira da metoda dobro funkcionira i u operativnim modelima, tim više što nije zanemariv i odnos s ostalim izvorima i numeričkim metodama u modelu. Pravi test za svaku metodu bila bi naravno implementacija u valni model i provedba odgovarajućeg eksperimenta.

Zaključak

Od kada je izveden Boltzmannov integral napravljen je veliki napredak u razumijevanju uloge četverostrukog valnog međudjelovanja u razvoju vjetrovnih valova. Neovisno o znatnom napretku naših znanja na području primjene Boltzmannovog integrala u

numeričke valne modele primjena je još uvijek nepotpuna. Npr. nije poznato precizno područje primijenjivosti, također nije potpuno jasna uloga ovog međudjelovanja u određivanju oblika spektra u složenim situacijama. Praktično je pak pitanje odabir najbolje metode proračuna.

Boltzmannov integral originalno je izveden za duboku vodu uz pretpostavku homogenog i stacionarnog stanja mora i uz točnu rezonanciju između spektralnih komponenti. Ovaj osnovni koncept proširen je uključivanjem utjecaja plitkog područja i pretpostavkom ravnog dna. Valjanost Boltzmannovog integrala može se provjeriti samo korištenjem numeričke simulacije nelinearnog razvoja slobodnih površinskih gravitacijskih valova. U tijeku je niz istraživanja koja bi trebala potvrditi valjanost Boltzmannovog integrala za primjenu neovisno o bliku spektra i za plitku vodu s nagnutim dnom.

U praktičnoj primjeni, upravo spomenute pretpostavke se često zanemaruju, no nije poznato u kojoj mjeri to utječe na razvoj valnog polja.

Primjer snalaženja s tim netočnostima je način primjene DIA u plitkom području. Prema jednadžbi veličina međudjelovanja se povećava što je voda plića. Da bi se osigurala mogućnost riješavanja jednadžbe, primijenjena je donja granica bezdimenzionalne dubine kh = 0.5. Dosadašnji teoretski razvoj pokazao je da i skoro-rezonantna međudjelovanja mogu imati za posljedicu izmjenu energije. Također postoje i teoretska istraživanja koja su pokazla da je veličina nelinearnog prijenosa za $kh \approx 1.363$ znatno manja nego se prije smatralo.

Mnogi eksperimenti, započevši s JONSWAP mjerenjima, su potvrdili ulogu nelinearnog četverostrukog međudjelovanja na razvoj valova u uvjetima oraničenog privjetrišta što je rasvjetlilo mehanizam iza spuštanja spektralnog vrha, stabilizaciju spektra i direkcijsku distribuciju spektra ovisno o frekvenciji. Interesantna je i uloga tog međudjelovanja u plitkom i njegova relativna veličina u odnosu na druge fizikalne procese kao što su trostruko valno međudjelovanje (triada) i lom valova uslijed promjene dubine.

Razvijene su razne egzaktne numeričke tehnike za izračun Boltzmannovog integrala s velikom točnosti. Teoretski sve te metode trebale bi dati isto rješenje, no praktično svaka od njih radi neke suptilne izbore u numeričkoj evaluaciji Boltzmannovog integrala. Stoga je neophodno napraviti objektivnu usporedbu tih metoda. S praktične strane gledano, sve te metode su prezahtjevne za primjenu u operativnim modelima. Da bi se savladao taj problem razvijena je DIA metoda koja i sama ima niz. Najveći izazov zapravo je razviti metodu koja je dovoljno točna, a istovremeno prihvatljiva za primjenu u operativnim modelima. Mogući načini rješavanja ovog problema su proširenje DIA metode na općenitiji oblik, metoda primjene neuralnih mreža ili hibridne metode.

Vrlo je vjerojatno da svaka nova aproksimacija radi najbolje u nekim određenim uvjetima koji su i poslužili za verifikaciju. Stoga je izuzetno važno dobro razumijevanje uloge nelinearnog međudjelovanja u raznim uvjetima. U praksi, prva provjera nove metode je usporedba rezultata s egzaktnim rješenjem akademskog spektra. Pravi test je njena primjena u kombinaciji s drugim djelovanjima uslijed kojih spektar evoluira, kao što su ograničenje privjetrišta ili trajanje puhanja vjetra. Usporedba s egzaktnom metodom tada predstavlja referentnu točku za procijenu operativnih koristi metode. Naravno, pri tome je potrebno uspostaviti ravnotežu između dosizanja određene točnosti i zahtjeva koje se time postavlja na sam proračun.

1.2.4 Spektralna disipacija u dubokom

Disipacija energije u dubokom najslabije je shvaćen dio fizike potrebne za modeliranje valova.

Postoji opći dogovor da je najveći dio te disipacije posljedica loma valova, ali fizika procesa loma, posebno kod spektralnih valova, je slabo shvaćena. Koliko energije se gubi površinskim lomom valova i na kojem djelu spektra? Što uzrokuje da se valovi lome i što je uzrok prestanku loma? To su samo neka od pitanja na koja nema konkretnog odgovora. Kao drugi najveći gubitak energije pretpostavlja se disipacija uslijed međudjelovanja valova i turbulencije. Postoji i niz drugih mehanizama uslijed kojih dolazi do gubitka energije u uvjetima međudjelovanja vjetra i valova.

Jednostavno, može se reći da je fizika spektralne disipacije još uvijek nedostižna, a teoretska i eksperimentalna istraživanja u ovom području su rijetka i često kontradiktorna.

Ovdje će se promatrati 3 izvora disipacije energije, i to, disipacija uslijed loma valova, disipacija uslijed djelovanja valova i turbulencije i disipacija uslijed modulacije valova.

1.2.4.1 Disipacija uslijed loma valova

Opis problema

Članom S_{ds} u jednadžbi (1-2) obuhvaća se disipacijski proces izazvan površinskim lomovima valova (engl.: *whitecapping*) Ovdje je prikazan oblik koji se koristi u trećoj generaciji valnih modela. Formulacija člana S_{ds} izražena je sljedećom jednadžbom:

$$S_{ds}(f,\theta) = -C_{ds} \left(\frac{\alpha}{\alpha_{PM}}\right)^{m} \left[\left(1 - \delta\right) \left(\frac{k}{\overline{k}}\right)^{2} \right] \overline{\omega} E(f,\theta)$$
(1-18)

gdje su: C_{dis} , δ i *m* empirijski određene konstante, α sveukupna strmost valnog polja, α_{PM} strmost valnog polja u Pierson-Moskowitz valnom spektru, $\overline{\omega}$ srednja kutna frekvencija, \overline{k} srednji valni broj (slika 1-9).



Slika 1-9 Ulazni član površinskog loma valova, za JONSWAP spektar u dubokom i plitkom (definirano po Hasselmannu, 1974., za H_s =3,5m i T_p =7s) [Holthuijsen]

Pregled razvoja problema

Teorije koje opisuju disipaciju uslijed površinskog loma valova započele su radom Longnet-Higgins (1969.), nakon čega je uslijedilo 20-ak godina relativno velike posvećenosti ovom problemu, no unazad 15-ak godina praktički nije zabilježen nikakav napredak. Ovdje će se pažnja posvetiti uglavnom novijem napretku iz područja valne dinamike, no potrebno je dati i kratak pregled starijih teorija radi lakšeg shvaćanja i opisivanja današnjeg stanja. Ovaj pregled temelji se na opsežnim radovima Donelan i Yuan (1994.) i Young i Babanin (2006.), no sadrži i neka novija dostignuća.

Donelan i Yuan (1994.), te Polnikov (1993.) napravili su klasifikaciju teoretskih modela na 4 tipa:

- modeli površinskog loma valova (whitecap models)
- kvazisaturirani modeli
- probabilistički modeli
- turbulentni modeli.

Niti jedan od ovih modela ne barata fizikom loma valova koja, zapravo upravlja gubitkom energije. Sadašnji analitički modeli obrađuju ili stanje valova neposredno prije ili neposredno poslije loma, te se tako donose zaključci o disipaciji uslijed loma.

Među modelima koji analiziraju valove prije loma, prvi je razvijen probabilistički model Longnet-Higgins (1969.), a nešto kasnije su uslijedili modeli Yuan i sur. (1986.) i Hua i Yuan (1992.). Sve ove analize koriste Gaussovu distribuciju izdizanja površine za predviđanje, smanjenja valne visine nakon prekoračenja Stokesovog graničnog vala ili graničnog ubrzanja grebena vala (g/2). Kod ovih valova pretpostavlja se lom u trenutku kad se valna visina smanji do granične, a razlika se prebacuje na disipaciju. Upotreba granične vrijednosti pri tome varira od ekstremne Stokesove vrijednosti do srednje vrijednosti kod određene frekvencije (Phillips, 1958.). Ovako definirana disipacija linearno je ovisna o funkciji valnog spektra.

U novije vrijeme pokazalo se da valovi ne moraju nužno doseći ubrzanje g/2 da bi došlo do loma (Holthuijsen i Herbers, 1986.; Hwang i sur., 1989.; Liu i Babanin, 2004.). Nadalje, jednom kada dođe do loma ne moraju se zaustaviti kod Stokesove granične strmosti nego mogu nastaviti gubiti energiju sve do ispod čak i srednje strmosti. Stoga, iako konceptualno atraktivni, probabilistički modeli nisu proračunski prihvatljivi.

Drugi tip modela koji povezuju disipaciju i valove prije loma su kvazisaturirane metode (Phillips, 1985.; Donelan i Yuan, 1994.; Donelan i Pierson, 1987.). Ovi modeli se oslanjaju na tzv. ravnotežni raspon valnog spektra, unutar kojeg postoji neka vrsta saturacije spektralne gustoće. U tom području, pretpostavlja se da su vjetar, međudjelovanje valova i disipacija u ravnoteži. Stoga za svaki valni broj, prekomjerni doprinos energije od djelovanja vjetra i nelinearnog međudjelovanja neće dovesti do porasta spektra nego do loma valova i može se interpretirati kao lokalna (u valnom broju) disipacija. Ovako definirana disipacija u kubičnoj je ovisnosti s gustoćom spektra (Phillips, 1985.).

Donelan i Pierson (1987.) dodali su u razmatranja i utjecaj smjera valova na energetsku ravnotežu. Također su razdvojili i disperzivne i nedisperzivne (gravitacijske i kapilarne) valove obzirom na razlike u prirodi loma uslijed razlike u brzini širenja u odnosu na valnu grupu. Kao rezultat dobili su lokalnu funkciju disipacije (u valnom broju) sličnu Phillipsovoj ali njihov eksponent ovisi o valnom spektru i valnom broju, pa se može mijenjati u rasponu od 1 do 5, no u većini područja interesa je oko 5.

Ovaj tip modela ima čitav niz nedostataka. Prvo, cijeli koncept kvazisaturacije i intervala ravnoteže je pomalo sumnjiv (Donelan, 2003.). Čak i ako postoji, Phillipsov nivo saturacije nije konstanta nego ovisi o uvjetima okoliša (Babanin i Soloviev, 1998.). I što je još važnije, niti jedan od članova izvora nije eksplicitno i dovoljno točno poznat da bi se moglo popuzdano odrediti disipaciju kao preostali član gubitka. Isto tako, funkcija disipacije koja se temelji na lomu kratkih valova u promatranom intervalu ravnoteže nije uključena u disipaciju usljed dominantnog loma u blizini vrha spektra, što može biti značajan nedostatak (Babanin i sur, 2001.; Young i Babanin, 2006.). Konačno, postoj edokazi da dominantni valovi i njihov lom malo utječu na disipaciju (Meza i sur., 2000.; Donnelan, 2001.; Young i Babanin, 2006.). Ako se to pokaže istinito, disipacija u saturiranom intervalu ne može se prikazati kao funkcija u prostoru valnog broja.

Matematički najrazvijeniji i najčešće korišteni disipacijski model je Hasselmannov model (1974.). Ovaj model spada u grupu modela koji analiziraju problem nakon loma valova. Prema ovom modelu, jednom kada se uspostavi slučajna raspodjela površinskog loma valova, više nije bitno uslijed čega dolazi do loma. Rezultat ovog modela je linearna disipacija.

Polnikov (1993.) je sugerirao drugi tip modela nakon loma. Tvrdio je da neovisno o porijeklu loma rezultat je povećani intenzitet turbulencije. U njegovom pristupu raspon disipacije spektra je pokriven efektivnom turbulentnom viskoznosti. Stoga je za opis disipacije energije u obliku spektra dovoljno odrediti vezu između valnog spektra i spektra turbulencije. U tu svrhu, Polnikov je definirao dinamičku jednadžbu dobivenu usrdenjavanjem i uvođenjem Reynoldsovog naprezanja. Reynoldsovo naprezanje je

raspisao u red obzirom na komponente valne brzine i njihove prostorne derivacije. Prandtlovu pretpostavku je iskoristio za zatvaranje člana turbulencije u tom redu. Prema ovoj metodi disipacija je u kvadratnoj ovisnosti o spektru.

Ponovno, ideja je atraktivna, no teorija se treba još razvijati. Polnikov (1993.) je pretpostavio pojednostavljeni prikaz valne dinamičke jednadžbe sa efikasnim prigušenjem naprezanja prikladnim za monokromatske valove. No, postoji međusobno djelovanje spektralnih valova različitih veličina, i turbulentni granični sloj određene debljine nije samo rezultat disipacije njegovog pripadnog vala nego i sloma nekog većeg graničnog sloja (Kolmogorove kaskade). Uz to, primjena vrtložne viskoznosti na valno gibanje je u kontradikciji s prihvaćenim pristupom u ovom području.

Zaključak

Ovdje prikazan pregled postojećih teorija disipacije spektra, daje 4 različita analitička modela. Pri tome niti jedan od modela ne barata dinamikom loma valova koji je u stvari odgovoran za disipaciju. Svaki od modela sugerira hipotezu interpretacije valnog polja ili prije ili poslije loma, a zajedničko im je da zapravo svim ovim hipotezama nedostaje eksperimentalna podrška i potvrda. Pri tome rezultati variraju od toga da je disipacija linearna funkcija valnog spektra pa sve do funkcije reda na petu potenciju.

Eksperimentalna potvrda trebala bi biti važan element u razvoju teorije. Za kraj prikaza, ovdje će se navesti nekoliko eksperimentalnih studija koje su analizirale disipaciju podijeljene u dvije skupine. U prvoj skupini su studije koje su analizirale totalnu disipaciju – Thorpe (1993.), Melville (1994.), Terray i sur. (1996.), Hanson i Phillips (1999.), a u drugoj one koje su analizirale spektralnu disipaciju – Donelan (2001.), Phillips i sur. (2001.), Melville i Matusov (2002.), Hwang i Wang (2004.), Babanin i Young (2005.), Young i Babanin (2006.).

1.2.4.2 Disipacija uslijed međudjelovanja valova i turbulencija u atmosferi

Vrlo rano je uočeno da viskoznost ima zanemariv utjecaj na valove perioda dužih od 10 s (Lamb, 1932.), tako da jednom generirani valovi dugih perioda disipiraju polako uslijed djelovanja vjetra (Jeffreys, 1925.; Svedrup i Munk, 1947.). Ove teorije postupno su napuštene i prihvaćene su teorije vrtložne viskoznosti koje se koriste i danas u modelima (Groen i Dorrestein, 1950.; Tolman i Chalikov, 1996.).

Još nema dokaza da su profili brzine strujanja fluida uslijed valova nestabilni i da mogu postati turbulentni, osim za površinski viskozni sloj (debljine par milimetara) i za granični sloj na dnu. Stoga, osim u ovim graničnim slojevima, gibanje uslijed lokalne turbulencije nije nužno povezano s poljem brzine vala i nema teorije koja bi potvrdila primjenu vrtložne viskoznosti. Umjesto toga, rastezanje turbulentnih vrtloga uslijed valnog gibanja može dovesti do raznih efekata, a treba razotkriti i raspršenje valova uslijed turbulencije. U cilju prikaza rastezanja, primijenjena je teorija brzog izobličenja na vodnoj strani kontaktne površine (Teixeira i Belcher, 2002.). Teorija pretpostavlja da je vrijeme rotacije vrtloga manje od valnog perioda i da je brzina fluktuirajuće komponente znatno manja od brzine uslijed valova. Iste izraze za turbulentnu kinetičku energiju dobili su i Ardhuin i Jenkins (2006.) korištenjem Lagrangianovog usrednjavanja člana koji opisuje smicanje u turbulentnoj kinetičkoj jednadžbi.
1.2.4.3 Valne modulacije

Phillips (1963.) je uočio da lom kratkih valova u prisustvu dugih valova uzima dio energije. Ideju je revitalizirao Longnet-Higgins (1969.) koji je predložio mehanizam prema kojem lom kratkih valova potiče rast dugih valova. Ardhuin i Jenkins (2005.) su ustanovili da je ova disipacija kada ju se opisuje prihvatljivom modulacijskom transfer funkcijom minimalno veća od viskozne disipacije. Kudryavtsev i Makin (2004.) i Ardhuin i Jenkins (2006.) su procijenili veličinu modulacije vjetrovnih naprezanja korištenjem teorije brze distorzije u zraku. Veliki problem koji se javlja u ovom procesu su poteškoće u direktnim mjerenjima, što predstavlja veliki izazov daljnim istraživanjima.

Modeliranje funkcije disipacije spektra

Razumijevanje fizike valne disipacije sa stajališta spektra je prilično nepotpuno tako da je raspon disipacije spektra bolje opisan indirektno modeliranjem razvoja valnog spektra, nego direktno parametrizacijom poznatih fizikalnih značajki disipacije. Takvi pokušaji temeljili su se na pokušajima opisima člana dispacije pomoću postojećeg analitičkog modela (Komen i sur., 1984.; Polnikov, 1993.).

Općenito je priznato da najveći dio valne disipacije nastaje uslijed loma valova. Ipak, novija eksperimentalno otkrivena svojstva disipacije uslijed loma još nisu uključena u valne modele.

S druge strane, ako se funkcija disipacije ne prisili na prigušiti spektralnu energiju niskih frekvencija to može za posljedicu imati povratni dotok energije sa valova u atmosferski granični sloj, u iznosu i do četvrtine ukupnog protoka s vjetra na valove (Lavrenov, 2004.). Očigledno, to može imati značajan utjecaj na meteorološke prognostičke modele. Isto tako, Donelan i Meza (2005., WISE) su u dva različita rada prezentirali disipacijsku funkciju odgovornu za spuštanje vrha spektra, što se ranije nije koristilo, ali je u skladu s laboratorijskim eksperimentima Tulina i Waseda (1999.). Relativna važnost ovakvih mehanizama i njihov utjecaj na spektralne modele nije potpuno jasan.

Ovdje će se ukratko prikazati napredak u metodologiji modeliranja i potvrda funkcija disipacije prema osnovnim fazama, pri čemu se napredak u modeliranju disipacije vidi u povećanoj sposobnosti člana disipacije za reproduciranje rafiniranih svojstva razvoja spektralnih valova.

Temelje je postavio Komen i sur. (1984.) kada je prvi puta prikazao mogućnost dobivanja i prilagođavanja oblika funkcije disipacije spektra obzirom na ravnotežu svih članova izvora u jednadžbi (1-2). Izbor oblika funkcije u tom radu temelji se na interpretaciji Hasselmannovog analitičkog modela za disipaciju uslijed površinskog loma valova i uveden je niz testova razvoja valova kako bi se dobivene funkcije i potvrdile. Implementiranjem predloženih funkcija u tijek razvoja, model reproducira eksperimentalno poznati razvoj koji prati osnovna valna svojstva raspodjele spektra i vršne frekvencije. Nešto kasnije u raznim radovima definirane su i novije funkcije disipacije koje spadaju u ovu kategoriju (Makin i sur., 1995.; Tolman i Chalikov, 1996.; Schneggenburger i sur., 2000.).

Idući značajan korak u točnijem oblikovanju člana disipacije napravili su Young i Banner (1992., 1994.) kada su uveli zahtjev na modelirani razvoj koji se temeljio na primijeni odabrane funkcije disipacije, kako bi reproducirali eksperimentalno poznati oblik repa spektra valnog broja. Očigledno, spektralni modeli moraju biti sposobni simulirati razvoj direkcijskog spektra kao i njegovih sastavnih djelova. Ovaj dodatni zahtjev stavio je Komenov disipacijski član (Komen i sur., 1984.) na ozbiljan ispit i zaključeno je da taj član teško može zadovoljiti sve razvojne utjecaje istovremeno. Na posebne poteškoće se naišlo u pokušaju reprodukcije eksperimentalno poznatih direkcijskih svojstava valnog spektra. Noviji modeli u ovoj kategoriji su Meza i sur. (2002.), Alves i Banner (2003.), Lavrenov (2004.) i Donelan (WISE, 2005.). U sklopu ovih analiza demonstrirana je i osjetljivost razvoja na promjene ostalih članova izvora.

Uvođenjem novog niza direktnih testova u novijim pokušajima modeliranja funkcije disipacije (Banner, Kriezi i Morison, WISE 2004.) predloženo je da, budući da je najveći doprinos disipaciji onaj od loma valova, funkcija disipacije mora biti potvrđena svojom sposobnošću reproduciranja promatrane spektralne distribucije loma valova, istokao i obzirom na razvoj ovisan o spektru i osnovnim svojstvima. Za verifikaciju su korišteni rezultati Gemmerich (2005.), a cijela ideja je još uvijek u fazi razvoja.

U međuvremenu, očigledno je da iako najveći dio disipacije nastaje uslijed loma valova, postoje i drugi mehanizmi koji joj doprinose i općenito skup spektralnih i temeljnih ograničenja za samostalnu funkciju disipacije mora sadržavati utjecaj i tih mehanizama.

1.2.5 Nelinearno međudjelovanje u plitkom

Ovdje će se analizirati uloga nelinearnog međudjelovanja u plitkom. Prikazana su dva pristupa koja se koriste za opis valova koji napreduju prema obali. Prvi se sastoji u opisu valova determinističkim jednadžbama (pojednostavljeni model), a drugi se temelji na stohastičkim modelima koji se dobiju iz determinističkih pod pretpostavkom konzervativnih uvjeta.

Opis problema

Analogno kao i kod uvjeta rezonancije za četiri valne komponente, uvjet rezonancije za tri valne komponente zahtjeva da zbroj frekvencija i vektora valnih brojeva dva slobodna vala bude jednak frekvenciji i vektoru valnog broja trećeg vala: $f_1 + f_2 = f_3$ i $\vec{k_1} + \vec{k_2} = \vec{k_3}$ (slika 1-6). Ovaj zahtjev za rezonancijom nije u skladu s disperzijskim izrazom linearne valne teorije u dubokom, tako da se ovaj problem javlja samo u plitkom području. U prijelaznom području ovaj uvjet može biti približno ispunjen, pa se javlja približno rezonantno stanje.

Većina teoretskih prikaza trostrukog međudjelovanja u plitkom temelji se na Boussinesqovoj jednadžbi s raznim podvarijntama, ono što je za njih karakteristično je da su obično definirane u vremenskoj domeni, no mogu se transformirati u frekvencijsku. Takva transformacija iz vremenske u spektralnu domenu vrlo je komplicirana, i zasada uspješna samo u nekim specijalnim slučajevima. Stoga se u numeričkim modelima koriste ulazni članovi definirani nekom od jednostavnijih metoda (slika 1-10), a najuobičajenija među njima je LTA metoda (Lumped Triad Approximation, Eldeberky, 1996.).



Slika 1-10 Ulazni član međudjelovanja za JONSWAP spektar u plitkom (definirano LTA aproksimacijom (Eldeberky, 1996.) za H_s =3,5m, T_p =7s) [Holthuijsen]

Pregled razvoja problema

Povijesno gledano modeli u plitkom temelje se na klasičnoj Boussinesqovoj jednadžbi i Korteg i de Vries teoriji konstantne dubine s kraja 19. stoljeća, proširenoj na promjenjivu dubinu (Peregrine, 1967.). Ove teorije pretpostavljaju Stokesov (ili Ursellov) broj reda O(1), tj. nelinearnost i disperzija su pretpostavljene istog reda. Iako se originalno Boussinesqova aproksimacija zapravo može primjeniti samo kod slabe disperzije i nelinearnosti, što ograničava primijenu na jako plitko područje, noviji napredak sadrži punu nelinearnost (Wei i sur., 1995.) i utjecaje disperzije višeg reda (Madsen i sur., 2003.), te podržava modeliranje u prijelaznom području i vrlo veliku nelinearnost (Fuhrman i sur., 2004.).

Hasselmannova teorija međudjelovanja četiri rezonantna vala, koja predstavlja temelj većine dubokovodnih prognostičkih modela, ograničena je na duboko i prijelazno područje gdje je Stokesov broj ≤1 (Zakharov, 1999.). Isto tako, poznato je da međudjelovanje tri vala (triada) nije rezonantno u dubokom i prijelaznom području. No, uslijed napredovanja površinskih valova iz dubokog prema plitkom, triadno djelovanje preuzima dominantnu ulogu u dinamici promatranog problema.

Ovaj prijelaz sa četverostrukog na trostruko međudjelovanje je rezultat promjene u disperzijskoj jednadžbi iz disperzivnog dubokog režima koji ne podržava triadu (Phillips, 1960.) do nedisperzivnog plitkog režima u kojem sve valne komponente napreduju istom brzinom. Iako je triada egzaktno rezonantna samo za monodirekcijske valove u plitkom, međudjelovanja blizu rezonancije isto tako mogu imati značajnu ulogu u razvoju valova u plitkom obalnom području. Kao što je već spomenuto modeli širenja valova u plitkom području općenito se mogu podijeliti na dvije osnovne kategorije (Agnon i Sheremet, 2000.).

Deterministički modeli se obično izvode iz Eulerove jednadžbe za potencijalno strujanje (Laplaceova jednadžba i rubni uvjeti) uz pretpostavku slabe nelinearnosti u granicama plitkog područja, tj. $kh \rightarrow 0$. Ovi modeli rješavaju Boussinesqovu jednadžbu u frekventnoj domeni ili tzv. "mild slope equation".

Stohastički modeli koji su izvedeni iz determinističkih jednadžbi sa odgovarajućim zatvorenim rubnim uvjetima. Budući zatvorena aproksimacija neizostavno uključuje greške, deterministički model je u principu točniji nego pripadni stohastički model.

Isto tako, približavanjem vala obali, u obzir je potrebno uzeti i dodatne utjecaje kao što su trenje s dnom i lom uslijed promjene dubine.

Deterministički modeli

Vremenska domena Boussinesqovog modela tipično se primjenjuje na domenu sa prostornom skalom reda deset valnih duljina. Zahtjevni proračuni su oni koji onemogučavaju primijenu na veću skalu (Fuhrman i Birgham, 2004.). Štoviše, u praksi, potrebni rubni uvjeti za rješavanje po fazama često nisu dostupni i potreba za statistikom valnog polja zahtjeva proračun cijelog niza realizacija. Očigledno, uz znatne zahtjeve na svaku pojedinu realizaciju, simultano prevođenje istih je ekstremno vremenski zahtjevno za dvodimenzionalnu primjenu na dovoljno velikoj domeni. Unatoč novijem napretku u Boussinesqovom modeliranju, uključivo i modeliranje visoko nelinearnih valova (Wei i sur., 1995.) u prilično dubokom području (Madsen i sur., 2003.; Fuhrman i Birgham, 2004.) i širokom rasponu mogućnosti modeliranja refrakcije, refleksije i struja, računski zahtjevi proračuna statistike valnog polja za slučajni, direkcijski val ozbiljno ograničavaju primjenu takvih modela u obalnom području.

Uspješna alternativa modelima s vremenskom domenom su tzv. Spektralni modeli. Ova kategorija modela u osnovi prikazuje valno polje kao superpoziciju pravilnih valova (Fourierova analiza) i sastoji se od skupa razvojnih jednadžbi. Fourierovi modeli su atraktivni jer omogućavaju prirodni nastavak dubokovodnog pristupa, i vrlo su pogodni za baratanje s ulaznim podacima statističke prirode kao što su disipacija i vjetar. Za određivanje statistike valnog polja preporuča se Monte Carlo simulacija (Agnon i Sheremet, 1997.; Herbers i Burton, 1997.).

Stohastički modeli

Većina stohastičkih modela u plitkom sastoji se od dvije razvojne jednadžbe, jedne za valni spektar i druge za bi-spektar. Ove jednadžbe uveo je Saffman (1967.), na temelju Korteweg de Vries jednadžbi. Ista metodologija kasnije je korištena za definiranje stohastičkih modela na temelju različitih determinističkih jednadžbi (Agnon i Sheremet, 1997.; Herbers i Burton, 1997.; Eldeberky i Madsen, 1999.; Herbers, 2003.).

Stohastički modeli su efikasni u smislu što računaju statističke veličine direktno, bez simulacija, štoviše mogu biti inicijalizirani na otvorenoj granici sa valnim spektrom dobivenim mjerenjima ili iz regionalnog modela. Bi-spektar se obično inicijalizira preko standardne teorije 2. reda za jednoliku dubinu.

Zaslavskii i Polnikov (1998.) su na temelju općih jednadžbi trostrukog međudjelovanja izveli razvojnu jednadžbu za spektar valnog djelovanja. Pristup je u osnovi isti kao i kod izvođenja standardne Boltzmanove jednadžbe u dubokom. U slučaju jednodimenzionalnog napredovanja, numerički rezultati su uspješno uspoređeni sa eksperimentalnim podacima (Polnikov, 2000.; Piscopia i sur., 2003.).

Onorato i sur. (2004.) izveli su jednu razvojnu jednadžbu za razvoj spektra valnog djelovanja koja uključuje kvazi-rezonantno međudjelovanje, no još nisu objavljene usporedbe s eksperimentalnim podacima.

1.2.6 Disipacija na dnu

Jednadžba energetske ravnoteže vala eksplicitno sadrži član za disipaciju uslijed površinskog loma u dubokom moru. Kako valovi stižu u plitko područje, počinju "osjećati" dno.

Trenje s dnom – opis problema

Trenjem s dnom naziva se komplicirani mehanizam u relativno tankom (u usporedbi s dubinom) turbulentnom sloju na dnu koji nastaje uslijed gibanja vodnih čestica uzrokovanog površinskim valovima. U osnovi to je prijenos energije s orbitalnog gibanja čestica neposredno iznad tog sloja na turbulentna gibanja u samom sloju. Stoga taj prijenos ovisi o samom valnom polju, ali i o karakteristikama dna.

Razvijena su dva tipa modela za riješavanje ovog problema. U prvom modelu – modelu otpora, disipativni karakter turbulentnog sloja prikazan je jednim koeficijentom, koji se određuje empirijski za svaki pojedini uvjet valovanja i dna (Collins, 1972.). U drugom modelu – viskozno-vrtložnom modelu, disipativni karakter turbulentnog sloja definiran je u ovisnosti o parametrima dna (Madsen i sur., 1988.; Weber, 1991.).

S druge strane, jednostavna, ali često korištena alternativa navedenim modelima je Hasselmannov pristup problemu (Hasselmann i sur., 1973.) koji je definirao osnovne parametre neovisno o konkretnim svojstvima svakog pojedinog problema. Ovaj pristup se primjenjuje u većini operativnih modela i daje razumnu točnost.



Opći oblik ulaznog člana koji opisuje trenje s dnom prikazan je na slici 1-11.

Slika 1-11 Ulazni član trenja na dnu za JONSWAP spektar u plitkom (za H_s =3,5m, T_p =7s) [Holthuijsen]

Međudjelovanje valova i struja na naprezanja na dnu još nije u potpunosti riješeno, štoviše još se vode i rasprave da li je to međudjelovanje jako ili slabo (Kagan i sur., 2005.).

U konceptu jakog međudjelovanja i valna i strujna naprezanja na dnu su pojačana i nelinearnim međudjelovanjima. Ovaj pristup dan je u radovima Grant i Madsen (1979.) i Christoffersen i Jansson (1985.). Također postoje dokazi da je trenje s dnom češće kod srednjeg protoka (Wolf i Prandle, 1999.; Kagan i sur., 2005.), no nema opažanja niti teoretskih dokaza da struje znatnije utječu na trenje valova (Tolman, 1992.).

Drugi mehanizmi disipacije na dnu

Trenje s dnom nije jedini proces bitan za disipaciju valne energije na dnu. Shemdin i sur. (1978.) su dali pregled različitih utjecaja dna pa su se uz trenje s dnom pojavila još dva mehanizma:

- prigušenje zbog procijeđivanja u sloj na dnu
- upijanje energije u sloj mulja

Oba slučaja teoretski su razmatrana za više manje idealan slučaj.

U slučaju procijeđivanja do disipacije valne energije dolazi zbog polja tlaka na dnu uslijed kojeg nastaje tečenje u propusni sloj (Dean i Dalrymph, 1984.).

U slučaju dna prekrivenog muljem, teoretski do disipacije dolazi preko modela dva sloja, pri čemu je gornji sloj stupac vode koji se tretira kao idealni fluid. Val na slobodnoj površini uzrokovat će val na kontaktnoj površini vode i mulja što će prouzročiti tečenje u sloj mulja. Zbog njegove velike viskoznosti doći će do brzog prigušenja tečenja. Disipacija je u ovom slučaju znatno veća nego u prethodnom (Dean i Dalrymph, 1984.; Jiang i Mehta, 1996.; Ng, 2000.; Winterwerp, 2007.).

Zaključak

Kvalitativno, proces disipacije uslijed djelovanja s dnom je dobro shvaćen. Teorija postoji za disipaciju uslijed trenja, procjeđivanja i mulja. Kvantitativno gledano, razumijevanje nam je nekompletno.

Prije svega, položaj dna nije nepromjenjiv u vremenu. Disipacija uslijed trenja s dnom nije striktno lokalni proces, pa horizontalni pomaci unutar nekoliko stotina metara neće drastično utjecati na širenje valova.

Drugo, naša znanja o trenju i svojstvima prigušenja dna su ograničena. Često se izmjenjuju područja pijeska, mulja i stijena.

Prema svemu sudeći, jedini način za veći napredak u razumijevanju disipacije uslijed djelovanja s dnom je kombinirana analiza valnog polja i pronosa sedimenta, očigledno dva bliska problema. Poznato je da je svojstva tečenja i koncentracije sedimenta blizu dna teško mjeriti.

1.2.7 Numerika i rezolucija u valnom modeliranju

lako su najveći napori usmjereni prema spoznavanju fizikalnih procesa odgovornih za razvoj valova, matematički prikazano jednadžbom (1-2), treba spomenuti da izbor numeričke metode za dobivanje rješenja može biti izvor velike greške u rezultatima.

U načelu se koriste dva temeljno različita pristupa u rješavanju jednadžbe očuvanja valnog djelovanja. Metoda zraka, prikladna je i vrlo uspješna u stacionarnom području kada se zraka treba izračunati samo jednom (Cavaleri i Malanotte-Rizzoli, 1981.). S druge strane, prednost metode proračuna po točkama je da se zakon očuvanja djelovanja može provoditi vrlo striktno i da se nelinearni članovi ulaza uvode neposredno u svakom koraku. Problem ove metode je u tome što zahtjeva visoku rezoluciju prostorne i spektralne domene.

Greška uslijed numeričke sheme za prostorno napredovanje na prostornoj i spektralnoj domeni

Za potrebe analize, promatrat će se problem u jednodimenzionalnom obliku, s jednolikom brzinom, bez članova izvora i ponora, i sa samo jednom spektralnom komponentom, u obliku:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + c_{g,x} \frac{\partial E}{\partial x} = 0.$$
(1-19)

Diskretizacijom ove jednadžbe metodom konačnih razlika nastaje numerička greška. Na primjer, korištenjem eksplicitne upwind sheme prvog reda (WAM model) stvara se greška oblika (Petit, 2001.):

$$\frac{1}{2}c_{g,x}\Delta x(1-\mu)\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - \frac{1}{6}c_{g,x}\Delta x^2(1-\mu)(1-2\mu)\frac{\partial^3 E}{\partial x^3} + \frac{1}{24}c_{g,x}\Delta x^3(1-\mu)(6\mu^2 - 6\mu + 1)\frac{\partial^4 E}{\partial x^4} + O(\Delta x^4),$$
(1-20)

pri čemu je $\mu = c_{g,x} \frac{\Delta t}{\Delta x}$ Courant-Friedrichs-Lewyev broj (CFL). Iz toga se vidi da greška širenja vala ovisi o nekoliko veličina, i to: geografskoj rezoluciji, vremenskom koraku, brzini širenja i prostornoj promjeni polja spektralne gustoće.

Općenito se javljaju dvije vrste numeričke greške: numerička difuzija i numerička disperzija, ali i njihova kombinacija.

Numerička difuzija

Pojmom numerička difuzija opisuje se artificijsko raspršivanje energije pri propagaciji vala, a uzrokovana diskretizacijom kontinuiranog problema. Primjenom prikladnih numeričkih shema dovoljno visoke rezolucije ova difuzija naravno postaje sve manja, ne nužno u monotonoj ovisnosti. Ovisnost o CFL-u je isto tako različita. Na primjer, porastom CFL-a, difuzija implicitne upwind sheme prvog reda će rasti, dok će difuzija eksplicitne upwind sheme prvog reda padati dok ne postane nula, za $\mu = 1$. U dvodimenzionalnom slučaju, neke sheme su osjetljivije na smjer napredovanja (shema prvog reda u WAM modelu je posebno osjetljiva).

Numerička difuzija ne izaziva direktan gubitak energije. Numeričke sheme općenito korištenih modela treće generacije (WAM, SWAN) su potpuno energetski konzervativne.

Numerička disperzija

Numerička disperzija je praktičan efekt uvođenja konačnosti u osnovnu jednadžbu problema. Kao i numerička difuzija, numerička disperzija ovisi o CFL-u.

Greška u integraciji članova izvora

Integracija u vremenu članova izvora obično se provodi u zasebnom frakcijskom koraku valnog modela. U tom koraku rješava se jednadžba oblika $\frac{\partial E}{\partial t} = S$. Najjednostavniji način za rješavanje ovog problema je Eulerovov pristup prvog reda oblika $E^{n+1} = E^n + S\Delta t$, pri čemu su n i Δt broj i duljina vremenskog koraka. Nedostatak ovog pristupa je što zahtjeva predugo vrijeme proračuna. Stoga se u modelima treće generacije koristi semi-implicitna metoda oblika $E^{n+1} = E^n + \frac{S}{1 - \alpha D\Delta t}\Delta t$, gdje je D dijagonalni doprinos parcijalne derivacije S po E, a α parametar simetričnosti sheme (originalno je shema definirana kao vremenski usrednjena uz $\alpha = 0,5$, no u novije vrijeme se koristi $\alpha = 1$, čime je povećana stabilnost integracije). Sama za sebe shema nije dovoljno primijenjiva za korake reda 20 minuta, pa zato WAM modeli koriste limitator koji definira maksimalnu dozvoljenu promjenu ΔE u vremenu Δt .

Hersbach i Janssen (1999,) preformulirali su limitator WAM4 modela tako da ne ovisi o vremenskom koraku, no shema još nije konvergentna. Neke oblike metoda predložili su i razni drugi autori (Tolman, 2002.; Lavrenov, 2003.). Hsu i sur. (2005.) predložili su primjenu Taylor-Galerkinove metode konačnih elemenata.

1.3 Zaključak

U prethodnom poglavlju opisana je sadašnja situacija u raznim područjima valnog modeliranja. Generiranje valova vjetrom ekstremno je složen proces. Radi se o visoko nelinearnoj interakciji dva fluida gustoća različitog reda veličine, a što povlači pojavu raznih fenomena na kontaktnoj površini. Također, direktna vizualna promatranja baš i nisu od pomoći, naime dokazuju rezultate ali ne pomažu u tumačenju mehanizma prijenosa energije s jednog fluida na drugi. Korištenjem pojednostavljenih pretpostavki, intuicijom i mjerenjima, formulirane su neke osnovne teorije koje primijenjene na modelima daju dobre rezultate.

U dosadašnjim teorijama primijenjivana je pretpostavka linearnosti, odnosno smatra se da je površina superpozicija sinusnih komponenti, prema čemu se u najmanju ruku može biti sumnjičav. To zapravo dodatno naglašava dosada postignute rezultate i dokazuje značaj hipoteza koje su temelj današnjih teorija. Naime, činjenica da teorija koja se temelji na pretpostavki linearnosti daje dobre rezultate zapravo je vrlo zanimljiva.

Za nelinearna međudjelovanja u dubokom moru osnovni problem je praktična implementacija do sada dobro utemeljene teorije. Naime, već se dosta dugo vodi borba između punog opsega proračuna u teoriji i praktične mogućnosti sadašnjih računala. Sadašnje napori usmjereni su u cilju razvijanja novih numeričkih metoda (MDIA, neuralne mreža i sl.), ali pogoduje i sve veća moć računala koja sama po sebi smanjuje potrebno proračunsko vrijeme na prihvatljivu razinu. Novi proračuni zapravo su kompromis, svaka od novih metoda ima neka svoja ograničenja koja tek trebaju biti istražena.

Bez obzira što je teoretska definicija dana prije više od 40 godina još uvijek se aktivno razvija. A puna svojstva temeljne jednadžbe koja opisuje sam proces još je potrebno istražiti.

Broj različitih pristupa i predloženih novih rješenja za proračun nelinearnosti sugerira da je potrebna usporedba u idealnim i praktičnim uvjetima koja bi pomogla u definiranju svojstva i mogućnosti svakog modela.

Disipacija vjetrovnih valova u dubokom je ulazni podatak o kojem se zna najmanje. Zapravo, nema odgovora niti na temelju fizike procesa niti empirijski, za njeno modeliranje. Za sumarni pregled postojećih teorija disipacije spektra dano je nekoliko studija koje nude četiri različite analitičke metode. Pri tome niti jedan od modela ne radi s dinamikom loma valova, odgovornom za disipaciju. Svim tim pretpostavkama nedostaje eksperimentalna podrška ili potvrda. Rezultati variraju od disipacije kao linearne, preko kvadratne i kubne, pa do funkcije petog stupnja.

Ono što proizlazi iz danog pregleda je da nema dogovora oko analitičkih teorija disipacije spektra valne energije uslijed loma valova, teoretska funkcija disipacije znatno se razlikuje od eksperimenata, i povrh svega eksperimentalni rezultati se međusobno bitno razlikuju. Takvo stanje poznavanja fizike gubitaka uslijed loma valova ne pomaže modeliranju disipacije koje ide u svom vlastitom smjeru.

S druge strane, unazad par godina pokrenut je niz temeljnih istraživanja. No njihovi rezultati još nisu uvršteni u numeričke modele.

Pokušaji da se opiše više valnih svojstva valnog polja (ne samo značajne valne visine, perioda i smjera) doveli su do različitih pravaca istraživanja. Jasno je da svaka pretpostavka oblika spektra dana unaprijed, prije ili kasnije vodi do odstupanja rješenja od realnog stanja. To je dovelo do temeljnih izmjena u samom pristupu koje još nisu u mogućnosti biti uvrštene u same modele.

Nelinearna međudjelovanja u plitkom opisana su preko relevantnosti trećeg reda. Međudjelovanja u rezonantnim i njima bliskim uvjetima danas su aktivno područje istraživanja, a aktivnosti modeliranja ovom problemu prilaze iz različitih smjerova. Dok je stohastički pristup na otvorenom moru neosporan, u blizini obale gdje su promjene značajnije i stupanj nelinearnosti može biti višeg reda, deterministički pristup nameće se kao prirodno rješenje. Obzirom da je vrijeme očigledno ograničavajući faktor proračuna, ovaj pristup je moguć samo na malim modelima. Praktičan problem je također i veza sa otvorenim morem, a što je trenutno izvan dosega čak i na nivou odgovarajućih eksperimenata.

Nadalje, još je nepoznato kako razdijeliti gubitak energije kroz spektar. Isto tako većina proračuna nelinearnih modela provodi se na pojednostavljenoj batimetriji, a svaka primjena na realne uvjete postaje problematična.

Disipacija uslijed međudjelovanja valova i dna drugo je otvoreno područje. Problem je vezan na broj istovremenih i alternativnih mehanizama na dnu koji mogu disipirati energiju i teškoće analiziranja i mjerenja procesa dok se odvija.

Na kraju, iako su najveći napori usmjereni prema razvijanju spoznaje fizikalnih procesa odgovornih za razvoj valova, treba uočiti da izbor odgovarajuće numeričke metode za dobivanje rješenja igra važnu ulogu.

Dakle, može se reći da su postignuti rezultati svakako zadovoljavajući, ali isto tako da ima prostora za napredak i objašnjenje do sada nerazjašnjenih mehanizama. Moguća je i eventualna korekcija u temeljnom pristupu pojedinim uvjetno rečeno dobro opisanim mehanizmima ali i numeričkom rješavanju problema.

2 Prikaz numeričkog modela – MIKE 21/SW

U ovom radu koristi se numerički model MIKE 21/SW (DHI, 2009.). Model omogućava simulaciju generiranja, deformacija i zamiranja gravitacijskih vjetrovnih valova i valova mrtvog mora u području otvorenog mora i priobalja.

Modelom je omogućen izbor između dvije formulacije rješavanja, direkcijskom nevezanom parametarskom formulacijom spektra i punom spektralnom formulacijom. Prva formulacija je bazirana na parametrizaciji jednadžbe očuvanja valnog djelovanja u frekventnoj domeni kroz uvođenje nultog i prvog momenta valnog spektra kao zavisnih varijabli (Holthuijsen i sur., 1989.). Valno djelovanje N definirano je omjerom energije valnog spektra E i kutne frekvencije ω . Ova formulacija je u proračunskom smislu manje vremenski zahtjevna i primarno se primjenjuje na manjim prostornim domenama sa značajnije ograničenim privjetrištima do 50km. Ukoliko se želi analizirati valno generanje kroz djelovanja vjetra moguće je korištenje samo kvazistacionarnog moda u kojem se svaki valni događaj promatra kao neovisan. Druga formulacija oslanja se na radove Komen i sur. (1994.) i Young (1999.) u kojima je direkcijski valni spektar zavisna varijabla. Ova formulacija zahtjeva višestruko dulje proračunsko vrijeme, no daje i rezultate većeg stupnja točnosti, posebno na velikim prostornim domenama. U sklopu provedbe numeričkih analiza u ovom radu korištene su obje raspoložive formulacije, direkcijska nevezana parametarska formulacija (s kvazistacionarnim modom) i puna spektralna formulacija (s nestacionarnim modom). Nadalje, ukoliko se koristi direkcijska nevezana parametarska formulacija spektra model daje mogućnost izbora jednadžbe za vietrovalno generiranie. U provedenim numeričkim analizama korištene su dvije različite formule, prva je formalnog naziva SPM84 i definirana je u Shore Protection Manual (1984.), a druga je prema radu Kahma i Calkoen (1994.).

U punom obimu, modelom mogu biti modelirani procesi valnog generiranja s vjetrom, međusobnih valnih nelinearnih interakcija, refrakcije i shoalinga, interakcije valova i strujanja, promjene morskih razi uslijed plimnih oscilacija te disipacijski procesi izazvani trenjem s dnom, površinskim lomovima valova (engl.: white capping) i lomovima valova pri nailasku na male dubine.

Numerički model temelji se na diskretizaciji geografske-prostorne i spektralne domene s konačnim volumenima. U prostornoj domeni korištena je nestrukturirana mreža sačinjena od nepreklapajućih trokutastih ćelija, a u frekventnoj domeni korištena je logaritamska distribucija.

Vremenska integracija provodi se frakcionalnim koracima pri čemu je za propagaciju valnog djelovanja korištena multisekvencijalna Eulerova eksplicitna metoda. Konvektivni fluksevi proračunati su upwind numeričkom shemom prvog reda.

2.1 Osnovne jednadžbe

Numeričkim modelom valne dinamike omogućena je analiza generiranja, deformiranja i zamiranja gravitacionih vjetrovnih valova. Osnovna jednadžba analiziranog procesa je jednadžba očuvanja valnog djelovanja $N(x, y, t, \omega, \theta) = E(x, y, t, \omega, \theta) / \omega$, definiranog omjerom energije valnog spektra *E* i kutne frekvencije ω :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (cN) = \frac{S}{\omega}$$
(2-1)

gdje je: *t* vrijeme, (x, y) kartezijeve koordinate, $c = (c_x, c_y, c_\omega, c_\theta)$ propagacija valne grupe u 4-dimenzionalnoj (X, ω, θ) domeni, *S* član koji opisuje izvore i ponore energije, ∇ diferencijalni operator u 4-dimenzionalnoj (x, y, ω, θ) domeni, θ smjer valne propagacije, ω kutna frekvencija izražena jednadžbom linearne valne disperzije $\omega = \sqrt{gh \tanh(kh)}$, $k = 2\pi/L$ valni broj, *L* dužina vala, *h* dubina vode.

Četiri karakteristične propagacijske brzine c_x , c_y , c_ω i c_θ definirane su jednakostima $(c_x, c_y) = (dx/dt, dy/dt), c_\omega = d\omega/dt, c_\Theta = d\theta/dt$.

2.2 Funkcije izvora i ponora

Promijena energije sustava, *S*, predstavlja superpoziciju funkcija koje opisuju različite fizikalne fenomene, u obliku

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$$
. (2-2)
U prethodnom izrazu S_{in} predstavlja energiju koja u sustav dolazi od vjetra, S_{nl} opisuje
nelinearni prijenos energije između samih valova, S_{ds} disipaciju energije uslijed

površinskog loma valova, S_{bot} disipaciju enrgije uslijed trenja s dnom i S_{surf} disipaciju valne energije uslijed loma valova uzrokovanog promjenom dubine.

2.2.1 Utjecaj vjetra

Član izvora energije S_{in} definiran je prema rezultatima istraživanja prikazanih u radovima Janssen (1989., 1991.). U tim radovima je pokazano da intenzitet valnog generiranja ovisi o vremenu proteklom od inicijalizacije vala:

$$S_{in}(f,\theta) = \gamma E(f,\theta)$$
(2-3)

gdje je: $f = \omega/2\pi$ valna frekvencija, γ intenzitet valnog generiranja.

Intenzitet valnog generiranja definiran je izrazom:

$$\gamma = \omega \frac{\rho_Z}{\rho_V} \left(\frac{1,2}{\kappa^2} \mu \ln^4 \mu \right) \left[\frac{u_*}{c} \cos(\theta - \theta_w) \right]^2$$
(2-4)

gdje je: ρ_Z , ρ_V gustoće zraka i vode, κ Karmanova konstanta (0,41), θ_w smjer vjetra, θ smjer vala, u_* brzina trenja vjetra, $c = \omega/k$ fazna brzina vala, μ bezdimenzionalna kritična visina vala definirana izrazom $\mu = kz_o \exp(\kappa/m)$, z_0 hrapavost morske površine

inducirana djelovanjem vjetra $z_0 = z_{0b} + z_{0w}$ pri čemu z_{0b} opisuje utjecaje gravitacijskihkapilarnih valova, a z_{0w} utjecaje kratkih gravitacijskih valova. z_{0b} prikazan je parametarski u obliku

$$z_{0b} = z_{Charnock} u_*^2 / g \tag{2-5}$$

gdje je $z_{Charnock}$ modelska konstanta preporučene vrijednosti 0,01. Uobičajeno je $z >> z_{0w}$ pa je u tom slučaju

$$u_* = \frac{\kappa u(z)}{\ln \frac{z}{z_0}}.$$
(2-6)

U cilju određivanja vrijednosti u_* Jansson je pretpostavio logaritamski oblik raspodjele brzine vjetra po visini u obliku

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z + z_{0w}}{z_{0b} + z_{0w}}.$$
(2-7)

U samom modelu implementirana su tri načina određivanja parametara u_* i z_0 :

Nevezani model uz korištenje zakona otpora

U ovom slučaju veza između brzine vjetra na visini u(z) na visini z i brzine trenja vjetra dana je jednostavnim empirijskim izrazom oblika

$$u_*^2 = (\alpha + \beta u)u^2$$
 (2-8)
gdje su α i β konstante, a preporučene vrijednosti za visinu 10m iznad kontaktne
površine su $\alpha = 6.3 \cdot 10^{-3}$ i $\beta = 6.6 \cdot 10^{-5}$ (Smith i Bank, 1975). Prema tome hrapavost

površine mora može se odrediti prema izrazu

$$z_0 = z \exp(\frac{\kappa u}{u_*})$$
. (2-9)

Nevezani model po Charnocku

Ovaj model pretpostavlja da je z_{0w} u usporedbi sa z_{0b} mali, pa je hrapavost zraka definirana izrazom

$$z_0 = z_{0b} = z_{Charnock} u_*^2 / g .$$
 (2-10)

U ovim uvjetima gornje jednadžbe moguće je itearativno rješiti te tako odrediti visinu hrapavosti z_0 i brzinu trenja u_* . U cilju ograničenja broja ponavljanja proračuna ovog tipa, vrijednost naprezanja za različite kombinacije u_* izračunate su ranije i pohranjene u bazu podataka u rasponu u_* od 0–50m/s s korakom 0,5m/s.

Puna spektralna formulacija

U ovoj formulaciji hrapavost mora dana je izrazom

$$z_0 = z_{0b} + z_{0w} = z_{0b} \left(1 - \frac{\tau_w}{\tau}\right)^{-\frac{1}{2}} = \frac{z_{CHARNOCK} u_*^2}{g} \left(1 - \frac{\tau_w}{\rho_Z u_*^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$
(2-11)

gdje je τ_w naprezanje na morskoj površini inducirano djelovanjem vjetra, a τ ukupno naprezanje $\tau = \rho_z u_*^2$. Za poznatu brzinu vjetra na nekoj visini moguće je iterativno rješiti gornje jednadžbe i odrediti u_* . Ponovno definirana je baza podataka koja štedi ponavljanje postupaka ovog tipa za određivanje naprezanja za različite kombinacije brzine i naprezanja na morskoj površini u rasponu u_* od 0–50m/s s korakom 0,5m/s i τ_w u rasponu 0–5m²/s² s korakom 0,05m²/s².

Naprezanje na morskoj površini računa se po izrazu koji koriste WAM modeli faze 4.

2.2.2 Nelinearno međudjelovanje

Budući da je egzaktno rješenje trodimenzionalnog nelinearnog Boltzmannovog integrala (Hasselmann, 1962.) vremenski prezahtjevno za primjenu u numeričkim modelima primijenjena je parametrizacija ulaznog člana S_{nl} . Najuobičajenija parametrizacija, DIA metodom koja se koristi u većini modela treće generacije primijenjena je i u ovom modelu.

S. Hasselmann i sur. (1985.) su konstruirali operator nelinearnog međudjelovanja superpozicijom malog broja konfiguracija diskretnog međudjelovanja sastavljenih od susjednih međudjelovanja na konstantnoj udaljenosti. Ustanovili su da se nelinearni prijenos može dobro opisati jednim zrcalnim parom (slika 2-1). U svakoj konfiguraciji, dva valna broja su identična: $\vec{k_1} = \vec{k_2} = \vec{k}$, dok $\vec{k_3}$ i $\vec{k_4}$ ($\neq \vec{k}$) zadovoljavaju uvjet rezonancije $\vec{k_1} + \vec{k_2} - \vec{k_3} - \vec{k_4} = 0$ (i $\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4 = 0$). Druga konfiguracija odredi se iz prve prebacivanjem valnih brojeva $\vec{k_3}$ i $\vec{k_4}$ preko osi k. Pojednostavljeni nelinearni operator izračuna se primijenom metode simetrične integracije nad 2-dimenzionalnim kontinuumom i s dvije diskretne interakcije.



Slika 2-1 Dvije konfiguracije interakcije korišene u DIA. (Komen i dr. 1994.) Linije predstavljaju moguće krajnje točke vektora $\vec{k_1}$ i $\vec{k_4}$ za bilo koju interakciju u kompletnom području

Za konfiguraciju oblika

$$\omega_{1} = \omega_{2} = \omega$$

$$\omega_{3} = \omega(1 + \lambda) = \omega_{+}$$

$$\omega_{4} = \omega(1 - \lambda) = \omega_{-}$$
(2-12)

gdje je $\lambda = 0,25$, postignuto je zadovoljavajuće slaganje sa egzaktnim rješenjem. Iz uvjeta rezonancije određeni su kutevi θ_3 i θ_4 valnih brojeva $k_3(k_+)$ i $k_4(k_-)$ obzirom na os k: $\theta_3 = 11,5^\circ$ i $\theta_4 = -33,6^\circ$.

Diskretna aproksimacija međudjelovanja (DIA) najjednostavniji oblik ima u opisu promjene gustoće djelovanja u vremenu u prostoru valnog broja:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} N \\ N_{+} \\ N_{-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} Cg^{-8} f^{-19} \left[N^{2} (N_{+} + N_{-}) - 2NN_{+}N_{-} \right] \Delta k$$
(2-13)

gdje su $\partial N_{\partial t}$, ∂N_{+}_{d} i $\partial N_{-}_{\partial t}$ promjene u vremenu u valnim brojevima k, k + i k - uslijed diskretnog međudjelovanja unutar infinitezimalnog fazno-prostornog elementa Δk , f je frekvencija i C je numerička konstanta. Mrežna funkcija S_{nl} odredi se zbrajanjem jednadžbe (2-13) nad poljem svih valnih brojeva, smjerova i konfiguracija međudjelovanja.

2.2.3 Površinski lom valova

Disipacija uslijed površinskog loma valova opisana je članom izvora S_{ds} u jednadžbi (2-1). U modelu MIKE21/SW koristi se oblik koji je primijenjen u većini modela treće generacije valnih modela. Formulacija člana S_{ds} izražena je slijedećom jednadžbom:

$$S_{ds}(f,\theta) = -C_{ds} \left(\frac{\alpha}{\alpha_{PM}}\right)^m \left[(1-\delta) \frac{k}{\overline{k}} + \delta \left(\frac{k}{\overline{k}}\right)^2 \right] \overline{\omega} E(f,\theta)$$
(2-14)

gdje su: C_{dis} , δ i *m* empirijski određene konstante preporučenih vrijednosti (WAM modeli faze 4) $C_{dis} = 4,1 \cdot 10^{-5}$, $\delta = 0,5$ i m = 4, α sveukupna strmost valnog polja, α_{PM} strmost valnog polja u Pierson-Moskowitz valnom spektru, $\overline{\omega}$ srednja kutna frekvencija, \overline{k} srednji valni broj.

2.2.4 Trenje na dnu

Disipacija uslijed trenja na dnu opisana je članom S_{bot} izraženim jednadžbom

$$S_{bot}(f,\theta) = -C_f \frac{k}{\sinh 2kh} E(f,\theta)$$
(2-15)

gdje je C_f koeficijent trenja ovisan o temeljnom tlu i uvjetima tečenja (u rasponu od 0,001-0,01m/s (Komen, 1994.)), k valni broj, h dubina.

U model su implementirane četiri formulacije za rješavanje ovog problema:

• Konstantan koeficijent trenja

Ispitivanja na regionalnom WAM modelu (Komen i sur., 1994.) su pokazala da je srednja JONSWAP vrijednost $C_f = 2 \cdot 0.38 / g = 0.0077 m / s$ odgovarajuća za redovne oluje, pa je u MIKE21/SW modelu i definirana kao preporučena.

U ovoj formulaciji pretpostavlja se konstantan faktor trenja f_w kojim se određuje koeficijent trenja prema izrazu

gdje je u_b rms (root-mean-square) orbitalna brzina na dnu dana izrazom

$$u_{b} = \left[2\int_{f_{1}}^{f_{\max}}\int_{\theta}\frac{\overline{\omega}^{2}}{\sinh^{2}(kh)}E(f,\theta)d\theta df\right]^{\frac{1}{2}}.$$
(2-17)

Preporučena vrijednost za faktor trenja u modelu je $f_w = 0,021$.

• konstantna geometrijska hrapavost k_N (Weber, 1991.).

U ovoj formulaciji koeficijent trenja računa se prema izrazu (2-16), a faktor trenja se određuje prema izrazu Jonsson i Carlsen (1966.)

$$f_w = e^{-5.977 + 5.213(a_b / k_N)^{-0.194}}, \quad \text{za } a_b / k_N \ge 2,016389$$

$$f_w = 0,24, \qquad \text{za } a_b / k_N < 2,016389 \qquad (2-18)$$

pri čemu je a_b orbitalni pomak na dnu dan izrazom

$$a_b = \left[2\int_{f_1}^{f_{\max}}\int_{\theta}\frac{1}{\sinh^2(kh)}E(f,\theta)d\theta df\right]^{\frac{1}{2}}.$$
(2-19)

Preporučena vrijednost za geometrijsku hrapavost u modelu je $k_N = 0.04m$ (Weber, 1991.).

• konstantna vrijednost 50%-tno zastupljenog promjera sedimenta D_{50} uz pretpostavku pokretnog dna.

Ovaj pristup prvi put je korišten u trećoj generaciji valnih modela prema Tolmanovoj ideji (1996.). Današnja implementirana verzija dosta je različita od originalne ideje i koristi empirijske izraze koji se temelje na rezultatima mjerenja in-situ. Koeficijent trenja računa se kao produkt faktora trenja definiran izrazima (2-16) i orbitalne brzine na dnu. Preporučena vrijednost za D_{50} je 0,00025m.

2.2.5 Lom valova uslijed promjene dubine

Gubitak energije uslijed loma valova kod nailaska valova na plitko područje opisan je članom S_{surf} . U modelu je korištena formulacija Battjes i Janssen (1978.) definirana u obliku (Eldeberky i Battjes, 1996.)

$$S_{surf}(f,\theta) = -\frac{2\alpha_{BJ}Q_b\bar{f}}{\left(H_{rms}/H_{max}\right)^2}E(f,\theta)$$
(2-20)

gdje je $\alpha_{BJ} \approx 1,0$ kalibracijska konstanta, Q_b parametar lomljenih valova i \bar{f} srednja frekvencija. H_{max} , maksimalna valna visina, u plitkom području dubine d definirana je izrazom $H_{\text{max}} = \gamma h$, u kojem je γ parametar loma u rasponu od 0,5 do 1,0 ovisno o nagibu dna i valnim parametrima. Preporučena vrijednost u modelu je $\gamma = 0,55$.

Q_b parametar lomljenih valova određuje se iz jednadžbe

$$Q_{b} = \exp\left(\frac{-(1-Q_{b})}{(H_{rms}/H_{max})^{2}}\right)$$
(2-21)

korištenjem Newton-Raphson-ove iteracije. Za početnu vrijednost nelinearne iteracije koristi se slijedeća eksplicitna aproksimacija:

$$Q_{b} = (1+2x^{2}) \exp\left(\frac{-1}{x}\right) \qquad x < 0,5$$

$$Q_{b} = 1-2,04z(1-0,44z) \qquad z = 1-x \qquad 0,5 \le x < 1 \qquad (2-22)$$

$$Q_{b} = 1 \qquad x \ge 1.$$

2.3 Numerička implementacija

2.3.1 Prostorna diskretizacija

Diskretizacija geografske-prostorne i spektralne domene temelji se na metodi konačnih volumena. U prostornoj domeni korištena je nestrukturirana mreža sačinjena od nepreklapajućih trokutastih ćelija.

Valno djelovanje $N(x, y, \omega, \theta)$ prikazano je konstantnom vrijednosti na elementu i smješteno u njegovo težište.

U frekventnoj domeni korištena je logaritamska distribucija:

2.3.2 Vremenska integracija

Vremenska integracija provodi se sa frakcionalnim koracima pri čemu je za propagaciju valnog djelovanja korištena multisekvencijalna Eulerova eksplicitna metoda. Konvektivni fluksevi proračunati su upwind numeričkom shemom prvog reda.

U prvom korak se određuje aproksimativno rješenje N^* u trenutku (*n*+1) rješavanjem jednadžbe (2-1) bez članova izvora. A zatim se u drugom koraku računa novo rješenje N^{n+1} iz prethodno dobivenog rješenja uzimajući u obzir utjecaje članova izvora. (Vilsmeier i Haenel, 1995.)

2.3.3 Rubni uvjeti

Krute granice u prostoru su potpuno apsorbcijske (nema refleksije). Na zatvorenim granicama početni uvjeti definirani su s nultim valnim spektrom, odnosno sa odsustvom inicijalnog valnog gibanja na cijelom području prostornih domena, dok je kod otvorenih granica potrebno definirati ulazne podatke.

3 Modeli za kratkoročnu valnu prognozu

Formirana su dva modela za kratkoročnu prognozu: Jadranski model koji pokriva područje cijelog Jadrana i lokalni model definiran za područje splitskog akvatorija (obzirom na položaj mjerne točke) koji će poslužiti za definiranje metodologije koja bi se kasnije mogla provoditi na svim manjim akvatorijima sličnih dugoročnih karakteristika.

Potreba za definiranjem ovih modela izlazi iz raspoloživih podataka o vjetru na temelju kojih se provodi prognoza. Naime, na jadranskom numeričkom modelu koriste se podaci o vjetru iz prognostičkog modela ALADIN (podaci iz razdoblja od 10 godina), dok se na lokalnim modelima koriste i podaci s meteoroloških postaja (opažanja i do 40 godina). Ovim modelima dobivene kratkoročne valne prognoze korištene su u nastavku za određivanje dugoročne valne prognoze za područje Jadrana (obzirom na raspoložive podatke o vjetru, prognoze povratnog razdoblja mogu se smatrati pouzdanima za razdoblja do 30 godina, no analize su provedene do 50 godina) i za područje splitskog akvatorija (obzirom na raspoložive podatke o vjetru, prognoza povratnog razdoblja 100 godina)

U oba modela koristi se ranije opisani numerički model valnog generiranja MIKE 21/SW (DHI, 2009.).

3.1 Jadranski model za kratkoročnu prognozu

3.1.1 Ulazni podaci – geometrija i vjetar

Opće karakteristike Jadranskog mora

Bazen Jadranskog mora izduženog je, približno pravokutnog oblika površine 138600km², duljine 800km i širine 200km, a proteže se u smjeru NW-SE. Otrantskim vratima širokim 72km i dubokim 780m Jadran je povezan s Jonskim morem.

Batimetriju Jadranskog mora karakterizira izražena transverzalna i longitudinalna asimetrija. Sjeverozapadni dio vrlo je plitki, počevši od dubine 15m kod Venecije i Trsta (posljedica nanosa kopnenih voda koje utječu u to područje), dubina se lagano povećava prema jugoistoku do Jabučne kotline (u literaturi *Middle Adriatic Pit*) duge oko 130km u kojoj doseže dubinu 270m. Od Jabučne kotline prema jugoistoku dubina postepeno pada do predjela Palagruškog praga gdje najveća dubina iznosi oko 130m. Jugoistočno od Palagruškog praga dubina naglo raste do Južnojadranske kotline (u literaturi *South Adriatic Pit*) kružnog oblika u kojoj dosiže najveću dubinu, nešto preko 1200m. Dalje prema jugu dubina se ponovno smanjuje do 780m na Otrantskim vratima. U transverzalnom smjeru značajna je razlika u morfologiji obalnog područja. Zapadna (talijanska) obala relativno je glatka i pravilna, bez otoka, dok je istočna (hrvatska) obala bogata otocima i karakteristična po strmom padu dna u smjeru otvorenog mora.

Vjetar na području Jadranskog mora

Dominantni vjetrovi na području Jadranskog mora su bura (NE) i jugo (SE). Ostali vjetrovi javljaju se lokalno i to najčešće ljeti.

Bura je u pravilu snažan vjetar koji nastaje prodorom kontinentalnog polarnog zraka preko Dinarida (Senj, Split), te na sjeveru kod Trsta na Jadransko more. Prema klimatološkim istraživanjima (Heinmann, 2001.) buru uzrokuje nekoliko karakterističnih sinoptičkih situacija. Bura nastaje kada hladni zrak koji nailazi na vertikalnu prepreku (Dinarsko gorje) prelazi preko prepreke u hidrauličkom režimu strujanja koje završava hidrauličkim skokom čime se nadolazećem toku zraka znatno povećava brzina. Osnovna karakteristika bure je njena mahovitost, a udari bure mogu biti i dvostruko jači od srednjaka. Tijekom godine bura se najčešće javlja zimi i tada traje dulje i uz veće brzine nego kada se javi ljeti. Općenito, olujne bure (brzine veće od 17m/s) javljaju se duž cijele obale, ali se njihovo trajanje i učestalost smanjuje od sjevera prema jugu. Obzirom da na pojavu bure utječu karakteristike lokalne orografije ona se češće javlja na lokacijama ispod planinskih prijevoja. Statističke analize pokazale su da se bura najčešće javlja u Senju (više od 20 dana godišnje, s prosječnim trajanjem od preko 9 sati, od čega oko 10% s maksimalnim udarima i do 35m/s). Prosječno trajanje olujne bure na Jadranu je oko 12 sati, ali ponekad traje i dva dana. Prosječno trajanje bure koja tijekom svog trajanja dosegne olujnu jačinu je 40 sati, pa do 5 dana (Cushman-Roisin i sur., 2001.). Na području otvorenog mora bura nije toliko intenzivna, intenzitet joj je na otvorenom smanjen i do 30%. Zanimljivo je da novije statističke analize vjetra (Pirazzoli i Tomasin, 1999.) pokazuju opadajući trend i u učestalosti i u jačini bure na sjevernom Jadranu.

Jugo je vjetar jugoistočnog smjera duž Jadrana, a uzrokuje ga specifična orografija, tj. položaj Jadrana i planinskog lanca uz istočnu obalu te sinoptičke situacije koje pogoduju strujanju takvog vjetra. Jugo se javlja tijekom cijele godine, i razvija se postupnije nego bura. Isto kao i bura, jugo postiže olujnu jakost. Ono što je bitno kod juga je da dobro razvijeno jugo utječe na cijelo Jadransko more i to najčešće u jesen i zimi. Prosječno trajanje olujnog juga je 10 do 12 sati, a ponekad i do 36 sati. Maksimalna zabilježena brzina tijekom puhanja juga je 30m/s (Cushman-Roisin i sur., 2001.).

Maestral (NW) je tipični ljetni sjeverozapadni vjetar i predstavlja više od 50% svih ljetnih vjetrova. Karakterizira ga tipičan dnevni ritam, počinje ujutro laganim puhanjem, pojačava se tijekom poslijepodne i stišava navečer.

Lebić (SW) je jugozapadni vjetar koji nije ni čest niti dugotrajan.

Na Jadranu se još javljaju tramontana (N), levant (E), ponenat (W) i oštro (S).

Podaci o vjetru

Očigledno je da je točnost valnog modela direktno ovisna o točnosti meteorološkog modela koji definira ulazne podatke. Postoji niz studija o utjecaju polja vjetra na valne modele u primjeni na oceanima, poluzatvorenim i zatvorenim bazenima (Signell i sur., 2005.; Ardhuin i sur. 2007.; Bolanos-Sanchez i sur., 2007.). Modeli visoke rezolucije

bitni su u primjeni na manjim morima gdje je lokalno generiranje valova dominantno. U ovom radu korišteno je nekoliko izvora podataka o vjetru. Vjetrovno polje prema prognostičkom modelu ALADIN na jadranskom modelu s prostornom rezolucijom 4km i vremenskim korakom 3 sata, a na lokalnom modelu splitskog područja s prostornom rezolucijom 2km i vremenskim korakom 1 sat u razdoblju od 1.1.1992. do 31.12.2001., te za baždarenje modela u razdoblju koje se poklapalo s razdobljem mjerenja valnih visina, od 01.11.2007. do 15.12.2008. Nadalje zbog potreba dugoročne prognoze valnih visina navedeni 10-godišnji niz nije bio dostatan te su na lokalnom modelu korišteni i podaci s mjernih postaja i to Split-Marjan od 01.01.1966. do 31.12.2007., Hvar i Makarska od 01.01.1992. do 31.12.2007.

Prognostički model ALADIN (Aire Limitee Adaptation dinamique et Development InterNational) je razvijen u hidrostatskoj verziji i baziran je na rješavanju primitivnih jednadžbi. Njegova numerička implementacija je izvedna u kooperaciji sa nekoliko nacionalnih meteoroloških institucija. Model proizlazi iz globalnog ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) modela od Meteo-France (Courtier i sur., 1991.), s kojim izmjenjuje i podatke o većini fizikalnih relevantnih parametara (Cordoneanu and Geleyn, 1998.) potrebnih za definiranje rubnih uvjeta. Model se koristi u Državnom hidrometeorološkom zavodu Hrvatske. Rezolucija dovoljna za razlučivanje intenzivnih izmjena u smjerovima i intenzitetima prevladavajućih vjetrova na području Jadrana još se analizira. (Brzović, 1999.; Brzović i Strelec-Mahović, 1999.). Hrvatska verzija operativnog moda ALADINa provodi se na prostornoj domeni koja pokriva područje Hrvatske s Jadranom, te orografijom Alpa, Dinarida i Apenina s horizontalnom rezolucijom od 8km (Ivatek-Šahdan i Tudor, 2004.) i vremenskom rezolucijom od 3 sata.

Podaci korišteni u ovom radu su adaptirani na mrežu točaka od 2km horizontalne razlučivosti metodom dinamičke adaptacije. Klimatologija vjetra u prizemnom graničnom sloju proračunata je kroz razdoblje od 10 godina (1992.–2001.) s podacima vremenske razlučivosti 60 minuta za parametre brzine i smjera vjetra te maksimalnih 10-min udara. Konvencionalna verifikacija modeliranih vrijednosti brzine vjetra, napravljena na 5 mjernih postaja koje reprezentiraju različite klimatske zone u Hrvatskoj. Najbolji rezultati postignuti su u području kontinentalne Hrvatske gdje sistematska pogreška iznosi oko 1% srednje godišnje brzine vjetra, dok u obalnom području u blizini složenog terena vrijednosti sistematske pogreška je manja u ravnom nego u složenom terenu, no neovisno o lokaciji u prosjeku iznosi oko 10% srednje godišnje brzine vjetra. Spektralna usporedba izmjerenih i modeliranih vrijednosti vjetra u vremenskoj domeni ukazuje da je primarni maksimum spektralne snage vezan za prolaske sinoptičkih procesa dobro modeliran, kao i sekundarni dnevni i tercijarni poludnevni maksimumi vezani za obalnu cirkulaciju (Bajić i sur., 2010.).

3.1.2 Opis modela

Na slici 3-1 prikazana je prostorna domena numeričkog modela valnog generiranja kojom je obuhvaćeno područje cijelog Jadrana i korištena batimetrijska podloga bazirana na prostornoj kontinuiranoj rasterskoj mreži podataka od 7,5' (≈200m) u longitudinalnom i latitudnom smjeru te modelska diskretizacija prostorne domene sa nestrukturiranom mrežom trokutnih konačnih volumena (Detalj mreže prikazan je na

slici 3-2). Udaljenosti između numeričkih čvorova postavljenih u težištima konačnih volumena su varijabilne u rasponu od 160m do 9500m.

Modelska domena nema otvorenih granica, a sve krute granice su potpuno apsorbcijske (odsustvo refleksije). Usvajanjem takve pretpostavke, o izuzeću otvorenih granica, koje su očigledno prisutne u prirodi na Otrantu, unešena je početna pogreška u modelskom generiranju valova pri vjetrovima iz SE smjera. Obzirom na položenost obalne crte zaključuje se da je unešena pogreška prihvatljivo mala te da ima utjecaj na modelske rezultate samo na području bliskom Otrantu.

Početni uvjeti definirani su sa nultim valnim spektrom, odnosno pretpostavlja se nepostojanje početnog valnog gibanja na cijelom području modelske prostorne domene.



Slika 3-1 Prostorna domena numeričkog modela sa batimetrijskom podlogom i prostornom disktretizacijom sa trokutnim konačnim volumenima

Analiza podataka o vjetru korištenih u jadranskom modelu

U modelu su korištena valna polja dobivena prognostičkim modelom ALADIN u razdoblju od 01.11.2007. do 15.11.2008. za potrebe baždarenja modela, te valna polja iz razdoblja od 01.01.1992. do 31.12.2001. za daljnje analize.

Provedena je detaljna analiza ALADINom definiranih valnih polja za tri osnovna područja: Sjeverni, Srednji i Južni Jadran (slika 3-3). Analiza valnih polja provedena je za karakteristične situacije vjetra na promatranim područjima. Pri tome se jednom

situacijom smatralo neprekidno puhanje vjetra istog smjera u trajanju 3 sata sa srednjom satnom brzinom većom od 4,5m/s. Također, istom situacijom se smatralo ako dođe do otklona smjera u prvi susjedni smjer bez smanjenja brzine puhanja. Analizirani smjerovi prikazani su na slici 3-4.



Slika 3-2 Detalj prostorne domene numeričkog modela sa batimetrijskom podlogom i prostornom disktretizacijom sa trokutnim konačnim volumenima



Slika 3-3 Podjela Jadrana na tri karakteristična područja: Sjeverni, Srednji i Južni Jadran



Slika 3-4 Prikaz osnovnih smjerova vjetra po kojima je provedena analiza

Općenito, može se zaključiti da je tijekom promatranih 10 godina na sjevernom Jadranu u pravilu najjači prognozirani vjetar iz smjera NE, koji u nekim situacijama i dulje od 24 sata puše brzinom većom od 15m/s, dok je iz smjera W i NW prognozirano tek nekoliko situacija s brzinom preko 10m/s. Obzirom na položaj hrvatskih luka u tom području zanimljivi su vjetrovi SW, S i SE kojima se godišnji maksimumi satnih brzina uglavnom kreću u rasponu od 12-14m/s. Također, u analizama valnih polja posebna je pažnja posvećena situacijama u kojima duž cijelog Jadrana puše jugo, jer se u tim situacijama obzirom na duljinu privjetrišta generiraju najveći valovi na Sjevernom Jadranu.

Na Srednjem Jadranu također su dominantni vjetrovi iz smjera NE i SE koji svake godine bilježe po nekoliko situacija sa srednjim satnim brzinama preko 15m/s, pa sve do 20m/s. No za razliku od sjevernog Jadrana na ovom području izraženiji su vjetrovi iz smjera E i S. Isto tako, potrebno je primijetiti da se redovito javljaju situacije s brzinama većim od 10m/s iz svih smjerova.

Na Južnom Jadranu, najjači i najčešći su vjetrovi iz smjera SE koji pušu i srednjom satnom brzinom preko 20m/s a pojedine situacije traju i po nekoliko dana.

Općenito u sva tri područja vjetar brzine veće od 10m/s neovisno o smjeru puše približno 20 do 25 dana godišnje. Iznimka je 2000. godina u kojoj je prognozirana nešto slabija godina, pa je tako na sjevernom Jadranu broj dana s vjetrom srednje satne brzine veće od 10m/s manji od 10 dana, na srednjem Jadranu manji od 15 dana, a na južnom Jadranu manji od 20 dana. S druge strane 1996. i 1999. godine na južnom Jadranu prognozirano je preko 30 dana sa srednjom satnom brzinom većom od 10m/s.

Ukupno je analizirano približno 4000 situacija na svakom području Jadrana među kojima na sjevernom Jadranu po broju dominiraju situacije smjera NE, na srednjem Jadranu zabilježen je približno jednak broj situacija iz smjerova NE i SE, dok na južnom Jadranu dominiraju situacije smjera SE. Na svim područjima zabilježen je relativno mali broj situacija svih zapadnih smjerova.

U Dodatku B prikazana su vjetrovna polja najzanimljivijih prognoziranih situacija vjetra po područjima, smjerovima i godinama, te su dana i pripadna polja valnih visina u promatranim situacijama dobivena odabranim numeričkim modelom MIKE 21/SW.

3.1.3 Analiza osjetljivosti i kalibracija modela

Za potrebe verifikacije numeričkih modela valne dinamike korištene su dvije valografske postaje. Postaja V1 ($\varphi = 44^{0}44,5$ 'N i $\lambda = 13^{0}10,2$ 'E) smještena je u području otvorenog mora sjevernog Jadrana, a druga postaja V2 ($\varphi = 43^{0}29,3$ 'N i $\lambda = 16^{0}27,9$ 'E) ispred grada Splita (slika 3-5). Mjerenja su provedena u periodu od 01.11.2007. do 15.11.2008. tijekom provedbe Programa praćenja stanja Jadranskog mora – Jadranski projekt (Andročec i sur., 2009.).

Registracija na postaji V1 interesantna je zbog relativno dugačkih privjetrišta za vjetrove iz smjerova SE-jugo (700km), NE-bura (50km) i SW-lebić (100km). S druge strane, istočna obala srednjeg i južnog Jadranana sadrži veliki broj otoka s razvijenim kanalskim sustavom. U takvim područjima privjetrišta su relativno kratka i predstavljaju limitirajući faktor u razvoju valne dinamike, pa trajanje vjetra ne predstavlja ograničavajući faktor u prenosu energije sa vjetra na valove. Zbog toga je za verifikaciju rezultata modela u uvjetima izraženije ograničenog privjetrišta i odabrana pozicija valografske postaje V2, smještene u Splitskom kanalu.

Korišten je Valograf tvrtke Datawell koji se sastoji od plutače (tipa MKIII) s ugrađenim GPS prijemnikom i digitalnim uređajem za registriranje podataka (slika 3-6). Prijenos podataka s mjerne plutače do registratora obavlja se upotrebom radio i GSM komunikacije. Valograf kontinuirano mjeri valove do visine 20m i u rasponu perioda od 2s do 30s. Valografski bilježeni podaci sadržavaju standardne valne statistike za periode od 30 minuta. (Dodatak A)



Slika 3-5 Pozicije valografskih postaja V1 i V2 korištenih za baždarenje numeričkog modela

Kalibracijski parametri dostupni u modelu MIKE 21/SW su prostorna i spektralna domena, trenje s dnom, lom valova i površinski lom valova (*white capping*). Prostorna i spektralna rezolucija djelomično su limitirane kapacitetom korištenih računala, no nastojala se odabrati rezolucija koja omogućava proračun numeričkog modela u korisniku prihvatljivom vremenu.



Slika 3-6 Valografska plutača tvrtke Datawell usidrena u moru

Kod trenja s dnom moguće je varirati koeficijent trenja te na taj način, njegovim povećanjem u plitkom području povećati disipaciju energije što povlači smanjenje značajne valne visine i porast valnog perioda, dok je u dubokom njegov utjecaj zanemariv.

Parametri koji se koriste u opisivanju loma valova također mogu poslužiti u kalibraciji modela. Pri tome parametar α kontrolira veličinom disipacije energije nakon loma valova, dok parametar γ ovisan o dubini kontrolira udio loma vezanog za dubinu. Povećanjem parametra α povećava se i disipacija, a smanjenje parametra γ smanjuje udio loma vala vezano uz dubinu (oznake prema poglavlju 2.2).

Kod površinskog loma dva su slobodna parametra C_{dis} i δ prema Komenu preporučenih vrijednosti 4,5 odnosno 0,5. U slučaju modeliranih valnih visina manjih od mjerenih preporuča se u cilju poboljšanja modela smanjiti veličinu parametra C_{dis} (oznake prema poglavlju 2.2).

Analiza osjetljivosti Jadranskog numeričkog modela na pojedine ulazne parametre provedena je obzirom na utjecaj nelinearnog međudjelovanja valova (quadruplet, triada), trenja s dnom, loma valova uslijed promjene dubine i površinskog loma valova.

Generalni prikaz osjetljivosti na pojedine ulazne parametre prikazan je slikom 3-8 na kojoj su prikazani rezultati dobiveni formiranjem 6 različitih modela prikazanih u tablici 3-1. Analiziran je utjecaj prijenosa energije između valova: četverostruko međudjelovanje (karakteristično u dubokom moru) i trostruko međudjelovanje (karakteristično u plitkom području). Nadalje promatran je utjecaj loma valova uslijed promjene dubine sa odabranim konstantnim parametrom loma veličine 0,55, te utjecaj trenja s dnomu uz konstantni koeficijent trenja (Komen i sur., 1994.). Površinski lom valova analiziran je uz pretpostavljeni koeficijent disipacije $C_{dis} = 2,5$.

U svim modelima je korištena puna spektralna formulacija (PSF) u preliminarnima analizama odabrana kao vremenski zahtjevnija, ali potpunija i samim time točnija formulacija problema. Za ilustraciju je na slici 3-7 dana usporedba rezultata dobivenih korištenjem pune spektralne formulacije i parametarske formulacije spektra u jednom kraćem vremenskom razdoblju. Očigledno je da PSF bolje opisuje podatke s valografa, a posebno u situacijama viših valova. Ukoliko se koristi direkcijska nevezana parametarska formulacija spektra model daje mogućnost izbora jednadžbe za generiranje valova vjetrom. U provedenim numeričkim analizama korištene su dvije različite formule generiranja valova vjetrom, prva je formalnog naziva SPM84 i definirana je u Shore Protection Manual (1984.), a druga je prema radu Kahma i Calkoen (1994.).



Slika 3-7 Usporedba izmjerenog i modeliranog niza značajnih valnih visina ovisno o odabiru formulacije problema

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
Formulacija problema:	PSF	PSF	PSF	PSF	PSF	PSF
Prijenos energije: quadruplet, triad	quadruplet, triad	quadruplet	triad	quadruplet, triad	quadruplet, triad	quadruplet, triad
Lom valova uslijed promjene dubine: γ=const.=0,55	+	+	+	-	+	+
Trenje s dnom: Cfw=0,0077	+	+	+	+	-	+
Površinski lom valova – white capping: Cdis=2.5	+	+	+	+	+	-

Tablica 3–1 Modeli formirani za analizu osjetljivosti numeričkog modela

Usporedba rezultata dobivenih uzimanjem i ne uzimanjem u obzir navedenih parametara prikazana je grafički u nastavku. Na slici 3-8 za ilustraciju je dan usporedni prikaz dinamike valova (značajne valne visine, Hs) opisane sa svih 6 modela tijekom jedne karakteristične vjetrovne situacije. Sa slike je vidljivo da u dubokom nelinearno međudjelovanje *triad* nema nikavog utjecaja na dobivene rezultate isto kao i loma valova uslijed promjene dubine (obzirom da promatramo točke u dubokom). Nadalje, očigledno je da se u obzir mora uzeti utjecaj četverostrukog nelinearnog međudjelovanja *quadruplet*, a da se model mora kalibrirati na temelju koef. trenja s dnom koji ima neznatan utjecaj i koeficijenta disipacije energije uslijed površinskog loma valova koji ima znatan utjecaj.

Rezultati dobiveni modelima 1-6 uspoređeni su sa podacima izmjerenim u dvije točke tijekom studenog i prosinca 2007.



Slika 3-8 Usporedba izmjerenog i modeliranog niza značajnih valnih visina na poziciji valografske postaje V1 u ovisnosti o osjetljivosti na pojedine kalibracijske parametre



Slika 3-9 Usporedba izmjerenog i modeliranog niza značajnih valnih visina na poziciji valografske postaje V2 u ovisnosti o osjetljivosti na pojedine kalibracijske parametre

Prema opisu numeričkog modela u poglavlju 2, i prikazanoj parametrizaciji procesa površinskog loma valova direktno množenoj koeficijentom disipacije C_{dis} . očekivano je da površinski lom valova bude dominantan proces koji utječe na rezultate, a što je i vidljivo iz slika 3-8 i 3-9. U nastavku se provodi kalibracija modela za promatrani period mjerenja od nešto više od godinu dana upravo po parametru disipacije površinskog loma valova. Odnosno provedena je detaljna analiza rezultata dobivenih obzirom na variranje koeficijenta disipacije C_{dis} .

Kalibracija Jadranskog modela po koef. disipacije površinskog loma valova, Cdis

Nakon što je koeficijent disipacije površinskog loma detektiran kao dominantan faktor u baždarenju numeričkog modela provedena je detaljna analiza ponašanja modela u zavisnosti o istom. Kao početna veličina odabrana je od autora MIKE21/SW preporučena vrijednost C_{dis} =4,5, a zatim i veličine C_{dis} =3,5, C_{dis} =2,5 i C_{dis} =1,5.

Između vrijednosti dobivenih koeficijentima C_{dis} =4,5 i C_{dis} =3,5 praktički nema razlike, i primjena obje vrijednosti podcijenjuje rezultate mjerenja, te u nastavku nisu ni prikazane daljnje analize, dok je pažnja posvećena usporedbi koeficijenata C_{dis} =4,5, C_{dis} =2,5 i C_{dis} =1,5.

Na slikama 3-10 i 3-11 prikazana je usporedba rezultata dobivenih korištenjem sva tri koeficijenta u numeričkom modelu i rezultata dobivenih mjerenjima na valografskim postajama V1 i V2.

Vrijednosti srednje greške, AE, i korijena srednjeg kvadratnog odstupanja, RMSE, pri promjeni modelskog parametra C_{dis} u postupku baždarenja prikazane su u tablici 3-2.

V1	Hs		Hmax		Hs > 1m		Hmax > 2m	
	AE	RMSE	AE	RMSE	AE	RMSE	AE	RMSE
Cdis=4,5	0,036	0,269	-0,058	0,498	0,283	0,012	0,360	0,026
Cdis=2,5	-0,075	0,290	-0,278	0,608	0,084	0,012	-0,053	0,028
Cdis=1,5	-0,167	0,344	-0,460	0,752	-0,080	0,013	-0,390	0,032
V2	Hs		Hmax		Hs > 0,5m		Hmax > 1m	
	AE	RMSE	AE	RMSE	AE	RMSE	AE	RMSE
Cdis=4,5	0,039	0,001	0,042	0,002	0,215	0,276	0,374	0,579
Cdis=2,5	0,007	0,001	-0,024	0,002	0,137	0,238	0,212	0,553

Tablica 3-2 Vrijednosti srednje greške i korijena srednjeg kvadratnog odstupanja pri promjeni parametra C_{dis} u slučaju usporedbe svih valnih visina i u slučaju usporedbe viših valnih visina

Iz podataka u tablici 3-2 vidljivo je da u točki V1 na otvorenom moru preporučena veličina C_{dis} =4,5 najbolje opisuje značajne valne visine ako promatramo sve podatke, dok C_{dis} =2,5 najbolje opisuje valove značajnih valnihh visina većih od 1m. U zaštićenom području predstavljenom točkom V2 bolji rezultati se dobivaju korištenjem C_{dis} =2,5 u slučaju analize valova svih valnih visina i C_{dis} =1,5 u slučaju analize valova značajnih valnih visina većih od 0,5m. Obzirom da se jadranski model koristi za dominantno otvoreno i nezaštićeno područje, a da će se u nastavku za zaštićene akvatorije priobalnog područja definirati lokalni modeli (u ovom radu za područje Splita, a u daljnjim istraživanjima i za ostala područja), te da su u točki V2 razlike između C_{dis} =2,5 i C_{dis} =1,5 relativno male za daljnju analizu odabrana je veličina koja bolje pokriva vrijednosti u točki V1, i to u slučaju značajnih valnih visina većih od 1,0m kao relevantnih valnih visina kod definiranja valne klime. Dakle, za daljnje korištenje jadranskog modela u ovom radu je odabrana veličina C_{dis} =2,5.



Slika 3-10 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina na poziciji valografske postaje V1 u nekoliko zanimljivih situacija



Slika 3-11 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina na poziciji valografske postaje V2 u nekoliko zanimljivih situacija

3.1.4 Zaključak

Konačna analiza odabranog numeričkog modela

Na slici 3-12 i 3-13 prikazana je usporedba izmjerene i konačno odabranim modelom modelirane dinamike značajnih valnih visina i maksimalnih valnih visina na poziciji valografske postaje V1 tijekom analiziranog perioda (01.11.2007.–15.11.2008.) uz parametre definirane u prethodnim poglavljima. Termini koji nedostaju u zapisu s valografa posljedica su neispravnog rada uređaja u tim razdobljima.



Slika 3-12 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina H_s (gore) i maksimalnih valnih visina H_{max} (dolje) na poziciji valografske postaje V1 u razdoblju od 01.11.2007. do 29.05.2008.



Slika 3-13 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina H_s (gore) i maksimalnih valnih visina H_{max} (dolje) na poziciji valografske postaje V1 u razdoblju od 01.06.2008. do 15.11.2008

Prema slici 3-12 može se uočiti da na poziciji valografa V1 model dobro opisuje izmjerene vrijednosti. No, uočljiva je situacija u terminu djelovanja juga u razdoblju 17.– 18.05.2008. kada modelske vrijednosti znatno podbacuju obzirom na izmjerene. Razlog odstupanja modelskih vrijednosti od izmjerenih vrijednosti H_s i H_{maks} je vjerojatno loša prognoza intenziteta vjetra iz atmosferskog modela ALADIN. Naime, srednja vrijednost brzine vjetra dobivena modelom ALADIN tijekom perioda 17.–18.05.2008. na poziciji valografa V1 iznosi do 7,0m/s. Ukoliko se pretpostavi da je ta brzina konstantna na cijelom privjetrištu od 700km, značajna valna visina u promatranoj točki upotrebom Groen-Dorrenstein dijagrama bila bi H_s =1,4m, što je u skladu s rezultatima modela.

Na slici 3-14 prikazani su omjeri izmjerenih i modeliranih H_s na poziciji valografa V1 u terminima pojave ekstrema valnih visina i terminima prognoziranih ekstrema brzine vjetra. Obzirom da se ne raspolaže mjerenim podacima o brzini i smjeru vjetra, izmjerenim ekstremnim valnim visinama pridružen je smjer dominantnog prognoziranog vjetra u tim terminima.



Slika 3-14 Omjeri izmjerenih i modeliranih značajnih valnih visina na poziciji valografa V1 u terminima u kojima se pojavljuju ekstremi valnih visina i ekstremi prognoziranih brzina vjetra (po smjerovima) tijekom analiziranog perioda

Na slikama 3-15 i 3-16 prikazana je usporedba izmjerene i modelirane dinamike značajnih valnih visina i maksimalnih valnih visina na poziciji valografske postaje V2 tijekom analiziranog perioda (01.11.2007.–15.11.2008).



Slika 3-15 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina H_s (gore) i maksimalnih valnih visina H_{max} (dolje) na poziciji valografske postaje V2 u razdoblju od 1.11.2007. do 15.6.2008.



Slika 3-16 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina H_s (gore) i maksimalnih valnih visina H_{max} (dolje) na poziciji valografske postaje V1 u razdoblju od 20.08.2008. do 15.11.2008.

Sa slika 3-15 i 3-16 može se uočiti da na poziciji valografa V2 model dobro opisuje izmjerene vrijednosti.

Na slici 3-17 prikazani su omjeri izmjerenih i modeliranih *H*s na poziciji valografa V2 u terminima pojave ekstrema valnih visina.





Napominje se da su rezultantna polja brzine i smjerova djelovanja vjetra dobivene modelom ALADIN prognostičkog karaktera (rezultati su za +12h unaprijed), te ih je potrebno kritički analizirati.

Konačno, na slikama 3-18 i 3-19 prikazano je modelsko polje značajnih valnih visina *Hs* u terminima registriranih ekstrema *Hs* postignutih na poziciji valografske postaje V1 (23.11.2007. 12.00-18.00 – SE) i V2 (17.–18.04.2008.– SE) u promatranom razdoblju i pripadna polja vjetra prema prognostičkom modelu ALADIN. U oba slučaja modelom dobivene vrijednosti značajnih valnih visina manje su od onih izmjerenih, pa se ponovno vraćamo na prethodno spomenutu grešku ulaznih podatka o vjetru iz prognostičkog modela ALADIN.



Slika 3-18 Modelsko polje značajnih valnih visina H_s u terminu izmjerenog ekstrema H_s postignutog na poziciji valografske postaje V1 (23.11.2007. 12.00-18.00 – SE) i pripadno polje vjetra prema modelu ALADIN



Slika 3-19 Modelsko polje značajnih valnih visina H_s u terminu izmjerenog ekstrema H_s postignutog na poziciji valografske postaje V2 (06.03.2008. – NE) i pripadno polje vjetra prema modelu ALADIN

Zaključak

Numeričkim modelom valnog generiranja MIKE 21/SW provedena je analiza dinamike značajnih valnih visina na području Jadrana. Rezultati modelskih analiza uspoređivani su s rezultatima mjerenja na valografskim postajama tijekom perioda 01.11.2007.– 15.11.2008. Za generiranje valova na području modelske prostorne domene korišteni su podaci o brzinama i smjerovima vjetra iz prognostičkog atmosferskog modela ALADIN.
Rezultati provedenog istraživanja sa numeričkim modelom pokazali su slijedeće:

- Na poziciji valografa model dobro opisuje dinamiku značajnih i maksimalnih valnih visina.
- Izmjerene vrijednosti značajnih valnih visina Hs na poziciji valografa V1 (za Hs>1m) i V2 (za Hs>0,5m) prosječno su veće od modeliranih za 19% i 26%, što je u okvirima točnosti mjerenja i prognostičkog karaktera ulaznih podataka o vjetru prihvatljivo.

3.1.5 Kratkoročna prognoza jadranski model – rezultati

Numeričkim modelom generiranja vjetrovnih valova definiranim i kalibriranim u prethodnom poglavlju provedena je na temelju ulaznih podataka o vjetru iz prognostičkog modela ALADIN u razdoblju 1992.–2001. kratkoročna prognoza valnih situacija. Najzanimljivije situacije i pripadna polja vjetra prikazani su u dodatku B.

Za dodatnu verifikaciju modela iskorišteni su i rezultati objavljeni u radu Signell i sur. (2005.) u kojem je analiziran utjecaj ulaznih podataka o vjetru na modelirane valne visine. U radu su korišteni različiti modeli za prognozu brzine vjetra, a najsličniji u ovom radu korištenom modelu ALADIN su COAMPS i LAMI. COAMPS model (*The Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System*) je model s rezolucijom 4km i vremenskim korakom 6 sati, a LAMI (*Limited Area Model Italy*) je talijanski operativni prognostički model s vremenskim korakom 3 sata i prognozom +48h. Valovi su prognozirani ranije spomenutim modelom SWAN. Usporedba rezultata prikazana je na slikama 3-20 i 3-21 iz kojih je vidljivo da u ovom radu definirani model daje vrlo slične rezultate.



Slika 3-20 Polje brzina vjetra i polje značajnih valnih visina definirano različitim modeloma u situaciji juga 08.03.2001. – usporedba rezultata dobivenih u ovom radu (gore) i rezultata objavljenih u radu Signell i sur. (dolje)



Slika 3-21 Polje brzina vjetra i polje značajnih valnih visina definirano različitim modeloma u situaciji juga 31.03.2001. – usporedba rezultata dobivenih u ovom radu (gore) i rezultata objavljenih u radu Signell i sur. (dolje)

Na temelju svih prikazanih analiza može se zaključiti da formirani model dobro opisuje dinamiku značajnih valnih visina i da se kao takav može koristiti za kratkoročnu prognozu značajnih valnih visina na Jadranu. Ovako definirani model u nastavku će se koristiti za formiranje situacija na temelju kojih su definirane dugoročne prognoze značajnih valnih visina na Jadranu.

3.2 Lokalni model za kratkoročnu prognozu – Split

3.2.1 Ulazni podaci – geometrija i vjetar

PODACI O VJETRU KORIŠTENI U LOKALNOM MODELU

U modelu su korištena polja vjetra dobivena prognostičkim modelom ALADIN u razdoblju od 01.11.2007. do 15.11.2008. za potrebe baždarenja modela, te polja vjetra iz razdoblja 01.01.1992.–31.12.2001. za daljnje analize. Također, budući da zbog potreba dugoročne prognoze valnih visina navedeni 10-godišnji niz nije dostatan, korišteni su i podaci s mjernih postaja, Split-Marjan od 01.01.1966. do 31.12.2007., Hvar i Makarska od 01.01.1992. do 31.12.2007. Podaci o vjetru iz prognostičkog modela ALADIN za područje srednjeg Jadrana analizirani su u sklopu Jadranskog modela, pa je ovdje dan prikaz podataka s mjernih postaja.

Podaci o vjetru postaje Split-Marjan

U periodu od 01.01.1966. do 31.12.2007. na postaji Split-Marjan zabilježeno je ukupno 1199 sati sa srednjom satnom brzinom većom od 17m/s, i to gotovo sve iz smjerova NNE, NE i ESE, SE i SSE (detaljan prikaz dan je u dodatku C). Pritom su registrirane najveće srednje satne brzine veličine preko 30m/s iz smjera NNE, te nekoliko sati preko 25m/s iz jugoistočnih smjerova. Iz smjerova SW, WSW, W, WNW, NW i NNW u više od 40 promatranih godina zabilježeno je ukupno tek 58 sati s brzinom preko 11m/s što je obzirom na granicu modela (slika 3-26) bitan podatak. Naime, iz smjerova NW, W i SW modelom nije korektno obuhvaćeno privjetrište, no očigledno to i nisu dominantni smjerovi.

Također, obzirom na definiranu geometriju modela jasno je da se radi o relativno kratkim privjetrištima, za čije je aktiviranje pri većim brzinama vjetra koje se analiziraju (>5m/s) potrebno relativno kratko vrijeme (do cca 2 sata), trajanja puhanja vjetra nemaju značajnu ulogu.

Podaci o vjetru postaje Hvar

U periodu od 01.01.1993. do 31.12.2007. na postaji Hvar zabilježena su ukupno 33 sata sa srednjom satnom brzinom većom od 17m/s, i to sve iz smjerova E, ESE, SE i SSE i N (detaljan prikaz dan je u dodatku C). Pri tome su registrirane najveće srednje satne brzine veličine preko 25m/s iz smjera N, te nekoliko sati preko 20m/s iz jugoistočnih smjerova. Iz smjerova SW, WSW, W, WNW, NW i NNW u 15 promatranih godina zabilježeno je ukupno tek 32 sata s brzinom preko 11m/s što je ponovno obzirom na granicu modela (slika 3-26) bitan podatak. Također bitno je primijetiti da je postaja često bila u kvaru, te ukupno nije radila približno dvije godine.

Podaci o vjetru postaje Makarska

U periodu od 01.01.1993. do 31.12.2007. na postaji Makarska zabilježeno je oko 900 sati sa srednjom satnom brzinom većom od 17 m/s, iz smjerova NNE i NE (detaljan prikaz dan je u dodatku C). Pri tome su registrirane najveće srednje satne brzine veličine preko 30m/s iz smjera NNE, te nekoliko sati preko 25m/s iz smjera NE i N. Iz

smjerova WSW, W, WNW, NW i NNW u 15 promatranih godina zabilježeno je ukupno tek 30 sata s brzinom preko 11m/s. Također i ova je postaja relativno često bila u kvaru, te ukupno nije radila skoro tri i pol godine.

Analiza raspodjele vjetra s diskretnih točaka na područje lokalnog modela

Za dugoročnu prognozu povratnog razdoblja 100 godina potrebna su opažanja u trajanju minimalno 30 godina. Obzirom da se vjetrovnim poljima iz prognostičkog modela ALADIN raspolaže samo u periodu od 1992. do 2001., podaci su nedostatni za navedenu prognozu. No, oni su iskorišteni za definiranje modela raspodjele vjetra s diskretnih točaka (mjernih postaja) na cijelo područje lokalnog modela. Za splitsko područje na raspolaganju su mjerne postaje Split-Marjan ($\phi = 43^{0}31$ 'N i $\lambda = 16^{0}26$ 'E, H=122 m n.m.), Hvar ($\phi = 43^{0}10$ 'N i $\lambda = 16^{0}27$ 'E, H=20 m n.m.) i Makarska ($\phi = 43^{0}17$ 'N i $\lambda = 17^{0}1$ 'E, H=52 m n.m.) u periodu od 01.01.1992. do 31.12.2007., a postaja Split-Marjan i ranije od 01.01.1966. (slika 3-22).



Slika 3-22 Prostorni raspored korištenih mjernih postaja na području lokalnog modela

U svrhu definiranja korelacijskog modela raspodjele brzina vjetra s mjernih postaja na prostorno polje brzina vjetra provedena je statistička obrada podataka kako bi se uspostavila veza između vrijednosti u svakom elementu (2km x 2km) definiranog numeričkog modela i podataka na mjernim postajama. Model je formiran na temelju podataka o brzinama vjetra zabilježenim na mjernim postajama i podacima dobivenim prognostičkim modelom ALADIN u razdoblju od 1992-2001. Da bi se pokazalo da se radi o reprezentativnih deset godina za potrebe verifikacije modela provedena je analiza distribucije brzina vjetra na postaji Split-Marjan u promatranom periodu i u periodu od 1966.–2007.

Podaci o brzini vjetra podijeljeni su u razrede srednjih brzina vjetra manjih od 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, i većih od 20m/s. Za svaku godinu određen je broj pojavljivanja vjetra unutar definiranih razreda. Tako definirani podaci prikazani su po Gaussovoj (normalnoj) distribuciji u MicrosoftOffice aplikaciji EasyFitXL. Navedena aplikacija zadani set podataka obrađuje po 50-ak dostupnih distribucija. Također te u ovom slučaju preporuča korištenje Pareto 2 distribucije.

Prema dobivenim rezultatima prikazanim u tablici 3-3 i grafovima gaussove distribucije i razdiobe po razredima prikazanim na slikama 3-23 i 3-24, može se zaključiti da odabranih 10 godina kvalitetno opisuje period od posljednjih 40 godina te će se ovako definiran model moći primijeniti na ukupan period.



Slika 3-23 Gaussova distribucija za podatke 1966.–2007. (lijevo) i za podatke 1997.–2007. (desno)



Slika 3-24 Razdioba podataka po razredima brzina za podatke 1966.–2007. (lijevo) i za podatke 1992.–2001. (desno) – prikazane brzine odgovaraju srednjim vrijednostima promatranih razreda brzina, a u zadnjem razredu su sve vrijednosti veće od 17m/s

Distribucija	Parametri								
Distribucija	α	α1	α2	β	σ	μ			
Normalna $\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{2}\right)^2\right)$					1879.8	1073.1			
$f(x) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma}{\sigma}\right)\right)}{\sigma\sqrt{2\pi}}$					1921.8	1072.8			
Pareto 2 $f(x) = \frac{\alpha \beta^{\alpha}}{(x+\beta)^{\alpha+1}}$	1.019			295.99					
	0.850			192.07					
Paerson 6 $f(x) = \frac{((x-\gamma)/\beta)^{\alpha_1-1}}{\beta B(\alpha_1,\alpha_2) (1+(x-\gamma)/\beta)^{\alpha_1+\alpha_2}}$		0.870	1.130	435.27					
		0.602	1.318	899.88					
Lognormalna $f(x) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right)}{x \sigma \sqrt{2 \pi}}$					1.7864	5.6421			
					2.0735	5.4167			
Weibull $f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha - 1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right)$	0.646			647.09					
	0.543			570.37					
Gamma $f(x) = \frac{x^{\alpha - 1}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \exp(-x/\beta)$	0.326			3292.9					
	0.312			3442.6					

Tablica 3–3 Parametri provjerenih distribucija za podatke iz različitih perioda: gornji red 1966.– 2007., donji red 1992.–2001.

[Napomena: korištene oznake: α – parametar oblika distribucije (α >0), α_1 – parametar oblika distribucije (α_1 >0), α_2 – parametar oblika distribucije (α_2 >0), β – parametar veličine distribucije (β >0), σ – standardna devijacija, μ – srednja vrijednost]

Detaljan opis formiranja modela i sve provedene analize prikazani su u dodatku D.

Na temelju dobivenih rezultata usvojena je linearna zavisnost oblika $y = a + b \cdot x$ uz pretpostavku korištenja samo podataka s postaje Split-Marjan obzirom na dulji period opažanja te relativno kontinuirano raspodijeljene koeficijente korelacije po smjerovima.

U nastavku (poglavlje 3.3.5) će se na lokalnom modelu procijeniti valjanost tako definiranog modela u procesu generiranja vjetrovnih valova usporedbom valnih visina dobivenih definiranim modelom brzina vjetra, valnih visina dobivenih numeričkim modelom generiranja vjetrovnih valova prema podacima iz ALADINa i mjerenim valnim visinama na valografu V2 u splitskom akvatoriju. Važno je spomenuti da je model

definiran na temelju podataka s mjernih postaja i podataka iz ALADINa u razdoblju 1992.–2001., dok je ova analiza provedena u razdoblju mjerenja, krajem 2007.

3.2.2 Opis modela

Na slici 3-25 prikazana je prostorna domena numeričkog modela valnog generiranja kojom je obuhvaćeno područje Splitskog, Bračkog, Hvarskog, Korčulanskog i Neretvanskog kanala. Batimetrijska podloga bazirana je na prostornoj kontinuiranoj rasterskoj mreži podataka od 7,5" (≈200m) u longitudinalnom i latitudnom smjeru. Udaljenosti između numeričkih čvorova postavljenih u težištima konačnih volumena su varijabilne u rasponu od 150m do 500m.



Slika 3-25 Prostorna domena lokalnog numeričkog modela - Split sa batimetrijskom podlogom (korištena prostorna rezolucija batimetrijskih podataka je 7,5")

Modelska domena nema otvorenih granica a sve krute granice su potpuno apsorpcijske (odsustvo refleksije). Usvajanjem takve pretpostavke, o izuzeću otvorenih granica, koje su očigledno prisutne u prirodi na poveznicama između Šolte i Hvara, te Hvara i Korčule, unešena je početna pogreška u modelskom generiranju valova pri vjetrovima iz W smjera. Obzirom na intenzitete, učestalost i trajanja vjetra s prevalentnim W smjerom, te položenost obalne crte i batimetrijske gradijente, zaključuje se da unešena pogreška vrlo rijetko ima utjecaj na modelske rezultate i to samo na području bliskom spomenutim poveznicama između otoka.

Početni uvjeti definirani su s nultim valnim spektrom, odnosno pretpostavlja se odsustvo inicijalnog valnog gibanja na cijelom području modelske prostorne domene.



Slika 3-26 Diskretizacija prostorne domene lokalnog modela sa nestrukturiranom mrežom trokutnih konačnih volumena

3.2.3 Analiza osjetljivosti i kalibracija modela

Analiza osjetljivosti lokalnog modela na pojedine parametre nije posebno provođena, već je na temelju analiza provedenih na jadranskom modelu odmah provedena kalibracija modela po koeficijentu disipacije površinskog loma valova.

Kalibracija lokalnog modela po koeficijentu disipacije površinskog loma valova, C_{dis}

Vrijednosti srednje greške AE i korijena srednjeg kvadratnog odstupanja RMSE pri promjeni modelskog parametra C_{dis} u postupku baždarenja prikazane su u tablici:

V2	Hs		Hmax		Hs >	0,5m	Hmax > 1m		
	AE	RMSE	AE	RMSE	AE	RMSE	AE	RMSE	
Cdis=2,0	0.0463	0.0012	0.0580	0.0025	0.1373	0.2491	0.2058	0.5767	
Cdis=1,5	0.0396	0.0013	0.0441	0.0026	0.1109	0.2454	0.1477	0.5728	
Cdis=1,0	0.0241	0.0013	0.0125	0.0028	0.0714	0.2426	0.0663	0.6247	

Tablica $\overline{3}$ -4 Vrijednosti srednje greške i korijena srednjeg kvadratnog odstupanja pri promjeni parametra C_{dis} u slučaju usporedbe svih valnih visina i u slučaju usporedbe viših valnih visina na mjestu valografa V2



Slika 3-27 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina H_s na poziciji valografske postaje V2 uz korištenje različitih vrijednosti parametra C_{dis}

Iz podataka u tablici 3-4 vidljivo je da se u točki V2 u relativno zaštićenom području ispred Splita i u slučaju analize valova svih valnih visina i u slučaju analize valova značajnih valnih visina većih od 0,5m praktički isti rezultati dobivaju korištenjem C_{dis} =1,0 i C_{dis} =1,5. Iz ranijih analiza provedenih za slučaj Jadranskog modela i ovdje prikazanih rezultata očigledno je da je za svaki lokalni model provesti zasebno baždarenje na temelju mjerenih podataka i na taj način definirati koeficijent disipacije koj će se koristiti. U ovom radu za daljnje analize lokalnog modela korišten je C_{dis} =1,5.

3.2.4 Zaključak

Na slikama 3-28 i 3-29 prikazana je usporedba izmjerene i modelirane dinamike značajnih i maksimalnih valnih visina na poziciji valografske postaje V2 tijekom analiziranog perioda (01.11.2007.–15.11.2008.). Ovdje su uspoređeni rezultati dobiveni iz podataka o vjetru definiranih prognostičkim modelom ALADIN s mjerenim vrijednostima jer se u terminu mjerenja ne raspolaže podacima o vjetru na mjernim postajama i jer je model kalibriran i baždaren po podacima o vjetru iz ALADINa. U idućem poglavlju analizirani su rezultati dobiveni različitim ulaznim podacima o vjetru.

Sa slika se može uočiti da na poziciji valografa V2 model dobro opisuje izmjerene vrijednosti. Kao i u analizama prikazanima u poglavlju 3.1.4 uočljiva je situacija u terminu djelovanja juga (SE smjer vjetra) u razdoblju 17.–18.04.2008. kada modelske vrijednosti znatno podbacuju obzirom na izmjerene.







Slika 3-29 Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina H_s (gore) i maksimalnih valnih visina H_{max} (dolje) na poziciji valografske postaje V2 u razdoblju od 20.08.2008. do 15.11.2008.

Na slici 3-30 prikazani su omjeri izmjerenih i modeliranih značajnih valnih visina na poziciji valografa V2 u terminima pojave ekstrema valnih visina. Analogna slika prikazana je u poglavlju 3.1.4 (slika 3-17) te se može uočiti da lokalni model bolje od Jadranskog modela opisuje mjerene vrijednosti u ovom zaštićenom području.



Slika 3-30 Omjeri izmjerenih i modeliranih značajnih valnih visina na poziciji valografa V2 u terminima u kojima se pojavljuju ekstremi valnih visina i ekstremi prognoziranih brzina vjetra (po smjerovima) tijekom analiziranog perioda

Numeričkim modelom valnog generiranja MIKE 21/SW provedena je analiza dinamike značajnih valnih visina na području Jadrana. Rezultati modelskih analiza uspoređivani su su s rezultatima mjerenja na valografskoj postaji tijekom perioda 01.11.2007.– 15.11.2008. Za generiranje valova korišteni su podaci o brzinama i smjerovima vjetra iz prognostičkog atmosferskog modela ALADIN.

Rezultati provedenog istraživanja sa numeričkim modelom pokazali su slijedeće:

- Na poziciji valografa model dobro opisuje dinamiku značajnih valnih visina.
- Izmjerene vrijednosti značajnih valnih visina na poziciji valograf V2 (za Hs>0,5m) prosječno su veće od modeliranih za 17,5% što je u okvirima točnosti mjerenja i prognostičkog karaktera ulaznih podatka o vjetru prihvatljivo.
- Lokalni model daje vrijednosti značajnih valnih visina bliže mjerenim vrijednostima.

3.2.5 Kratkoročna prognoza lokalni model – rezultati

Kratkoročna prognoza na lokalnom modelu provedena je ovisno o podacima o vjetru na dva načina: korištenjem podataka o vjetru iz prognostičkog modela ALADIN i korištenjem podatka o vjetru s mjerne postaje Split-Marjan uz primjenu u ovom radu definiranog modela distribucije brzine vjetra.

Prije analize dobivenih rezultata provedena je analiza primijenjivosti definiranog modela raspodjele brzine vjetra s mjerne postaje na promatrano područje.

Na slikama 3-31 i 3-32 prikazano je nekoliko situacija bure i juga u studenom i prosincu 2007. (jedini period u kojem se raspolaže podacima s mjernih postaja, podacima

prognostičkog modela ALADIN i mjerenim valnim visinama). Budući da se radi o premalom broju podataka za statističku obradu prikazane slike smatrat će se potvrdom prihvatljive kvalitete modela distribucije brzine vjetra s mjerne postaje Split-Marjan na promatrano polje vjetra za potrebe prognoze valnih visina. Potrebno je napomenuti da su brzine vjetra u analizi koja koristi podatke iz ALADINa definirane s vremenskim korakom od 3 sata, a brzine vjetra u modelu distribucije brzine vjetra s korakom 1 sat. Iz slika se može vidjeti da primjena formiranog modela daje vrlo dobre, pa čak i bolje rezultate u usporedbi s mjerenim podacima.



Slika 3-31 Usporedba izmjerenog i različitim ulaznim podacima o vjetru modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina na poziciji valografske postaje V2 u nekoliko zanimljivih situacija bure



Slika 3-32 Usporedba izmjerenog i različitim ulaznim podacima o vjetru modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina na poziciji valografske postaje V2 u nekoliko zanimljivih situacija juga

Nažalost u spomenutom periodu nisu zabilježeni vjetrovi značajnijih brzina iz drugih smjerova te će se za druge smjerove usporediti rezultati polja značajnih valnih visina dobivenih korištenjem polja brzina vjetra dobivenim prognostičkim modelom ALADIN i u ovom radu definiranim modelom. Zbog nedostatka drugih podataka za ovu analizu korišteni su podaci iz perioda preko kojeg je model i formiran.

Najzanimljiviji rezultati analize prikazani su na slikama 3-33 do 3-36 za osnovne smjerove u promatranom periodu od 1993.–2007. Na slikama su prikazana polja vjetra definirana prognostičkim modelom ALADIN (izuzetno je važan smjer puhanja vjetra, koji je u nekim situacijama izrazito promjenljiv), te polja značajnih valnih visina dobivena korištenjem istog numeričkog modela ali za različite ulazne podatke o vjetru (valna polja iz ALADINa i valna polja definirana ranije opisanim modelom raspodjele brzine vjetra s postaje Split-Marjan na cijelo promatrano područje).

Poseban osvrt potreban je za vjetrove zapadnih smjerova za koje su analize formiranja modela rasprostiranja brzine vjetra s mjerne postaje na cijelo promatrano polje pokazale relativno niske koeficijente korelacije. Na slici 3-33 može se vidjeti jedna od takvih situacija koja je korištena za formiranje modela kada je na postaji Split-Marjan zabilježen vjetar iz smjera zapada, dok je iz slike polja vjetra dobivene prognostičkim modelom ALADIN vidljivo da je područje zapadnog vjetra vrlo malo, u neposrednoj brzini mjerne postaje, te se u skladu s tim istim modelom generiranja valova dobivaju potpuno različite valne visine. Isto tako, iz slike, se može vidjeti da je relativno mala brzina vjetra na postaji Split-Marjan modelom transformirana u znatno veće brzine nad područjem koje se promatra, ali nažalost krivog smjera. S druge strane, na slici 3-34 prikazana je jedna od ekstremnih godišnjih situacija u kojoj je postignuto vrlo dobro poklapanje rezultata, osim u Neretvanskom kanalu, primarno zato što je zapadni vjetar i prema prognostičkom modelu ALADIN u ovoj situaciji dominirao nad gotovo cijelim područjem.

Očigledan problem nastaje u situacijama u kojima po prognostičkom modelu ALADIN smjer vjetra nije ujednačen na cijelom području (vrlo često za vjetrove zapadnih smjerova) te modelom definirani podaci o vjetru konstantnog smjera na cijelom području vezanog za mjernu postaju Split-Marjan daju znatno veće vrijednosti značajnih valnih visina. Za ove smjerove potrebno je provesti detaljnije analize sa meteorološkog stajališta kako bi se eventualno po smjeru korigirani model mogao kasnije koristit u praksi. Jedno od mogućih rješenja je i definiranje manjih lokalnih akvatorija, no način njihovog definiranja morao bi se definirati za svaku pojedinu lokaciju zasebno.

Isto tako postoji i problem točnosti prognostičkog modela ALADIN, ali i mikrolokacije mjerne postaje Split-Marjan, pa i same točnosti mjerenja. Na slici 3-35 prikazana je situacija u kojoj je na postaji Split-Marjan zabilježen vjetar SW smjera, te je za njega modelirana situacija valnog polja na najdoljnjoj slici dok je u ALADINu smjer vjetra na cijelom području bio S do SE. Ovdje treba napomenuti da ovakva situacija nije utjecala na formiranje modela rasprostiranja vjetra s mjerne postaje na promatrano područje jer je prvi uvjet u formiranju skupa podataka na temelju kojih je provedena analiza bio da se poklapaju smjerovi vjetra na mjernoj postaji i u istoj točki polja vjetra definiranog ALADINom.

Na slici 3-36 prikazana je jedna od situacija vjetra smjera SE, koja kvalitativno i kvantitativno relativno dobro opisuje valno polje u oba slučaja ulaznih podataka, no ipak je uočljiva razlika obzirom da prema ALADINu vjetar ipak nije konstantno istog smjera kako to pretpostavlja formirani model.

Prema tome, može se zaključiti da je definirani model moguće koristiti za neke od smjerova, za koje je u nastavku i provedena dugoročna prognoza valne klime, dok za preostale smjerove treba definirati poboljšani model koji bi obuhvatio i raznolikost vjetra po smjeru na promatranom području.



Slika 3-33 Usporedba polja valnih visina dobivenih korištenjem podataka o vjetru iz modela ALADIN i brzina vjetra iz modela definiranih u radu – smjer W, 01.08.2000. (polje vjetra – ALADIN, polje značajnih valnih visna prema podacima o vjetru iz ALADINa, polje značajnih valnih visina prema podacima o vjetru u radu definiranog modela)



Slika 3-34 Usporedba polja valnih visina dobivenih korištenjem podataka o vjetru iz modela ALADIN i brzina vjetra iz modela definiranih u radu – smjer W, 13.09.1998. (polje vjetra – ALADIN, polje značajnih valnih visna prema podacima o vjetru iz ALADINa, polje značajnih valnih visina prema podacima o vjetru u radu definiranog modela)



Slika 3-35 Usporedba polja valnih visina dobivenih korištenjem podataka o vjetru iz modela ALADIN i brzina vjetra iz modela definiranih u radu – smjer SW, 08.01.2001. (polje vjetra – ALADIN, polje značajnih valnih visna prema podacima o vjetru iz ALADINa, polje značajnih valnih visina prema podacima o vjetru u radu definiranog modela)



Slika 3-36 Usporedba polja valnih visina dobivenih korištenjem podataka o vjetru iz modela ALADIN i brzina vjetra iz modela definiranih u radu – smjer SE, 13.12.1995. (polje vjetra – ALADIN, polje značajnih valnih visna prema podacima o vjetru iz ALADINa, polje značajnih valnih visina prema podacima o vjetru u radu definiranog modela)

4 Modeli za dugoročnu valnu prognozu

Dugoročna valna klima definira se na temelju dugoročne valne prognoze. Dugoročna valna prognoza je postupak određivanja statističkih reprezentativnih parametara valnog profila (u ovom radu značajnih valnih visina) uz pridruženi smjer rasprostiranja. Definira se na temelju velikog broja kratkoročnih prognoza, a provodi se za razdoblja od 5 do 100 godina. Postupak određivanja dugoročne valne prognoze provodi se tako da se značajnoj valnoj visini pridruži vjerojatnost, ili povratno razdoblje u godinama.

Za provedbu dugoročnih prognoza optimalno razdoblje opažanja je 30 godina (da bi se prognozirala značajna valna visina 100 godišnjeg povratnog razdoblja). U ovom radu formirana su dva odvojena modela dugoročne prognoze:

- Dugoročna prognoza za područje cijelog Jadrana (na kojem se raspolaže podacima o vjetru iz kojih su definirane kratkoročne prognoze tijekom 10 godina) definirana do povratnog razdoblja 50 godina
- Dugoročna prognoza za područje lokalnog modela definirana je u dva slučaja:
 - Na temelju podataka iz prognostičkog modela ALADIN (podacima o vjetru iz kojih su definirane kratkoročne prognoze tijekom 10 godina) definirana do povratnog razdoblja 50 godina.
 - Na temelju podataka s mjernih postaja (raspolaže se podacima o vjetru s mjernih postaja u trajanju preko 40 godina) definirana do povratnog razdoblja 100 godina, ali samo za neke smjerove. Obrazloženje isključivanja pojedinih smjerova dano je u poglavlju 3.2.5.

U modelu dugoročne prognoze za područje Jadrana uzorak je formiran po kriteriju prekoračenja praga brzine vjetra (5m/s), dok je u modelu dugoročne prognoze lokalnog modela uzorak formiran po kriteriju godišnjih ekstrema brzina vjetra zabilježenih na mjernoj postaji Split-Marjan. Odabir metode formiranja uzoraka proveden je temeljem duljine razdoblja opažanja. Svaki od ova dva tipa uzorka s pripadajućom jednodimenzionalnom raspodjelom vjerojatnosti omogućava proračun značajne valne visine male vjerojatnosti pojavljivanja, odnosno dugog povratnog razdoblja.

Postupak proračuna u oba modela je jednak. Prvo se iz formiranog uzorka provede empirijska raspodjela vjerojatnosti u svakom elementu modela, i to tako da se uzorak poreda po opadanju u karakteristične razrede i proračuna se vjerojatnost prekoračenja srednje valne visine svakog razreda po Hazenovoj formuli

$$P(H_{s,i}) = P(\hat{H}_s \ge H_{s,i}) = \frac{2F_i - 1}{2n}$$
(4-1)

gdje je $H_{s,i}$ *i*-ta vrijednost slučajne varijable značajne valne visine, \hat{H}_s , u opadajućem uzorku, *n* opseg uzorka i F_i kumulativna apsolutna učestalost *i*-te vrijednosti slučajne varijable značajne valne visine. Nakon toga za skup uređenih parova oblika $(H_{s,i}, P(\hat{H}_s \ge H_{s,i}))$ definira se teorijska funkcija raspodjele vjerojatnosti slučajne varijable značajne valne visine. Obzirom da je u pravilu za veća povratna razdoblja potrebno provesti ekstrapolaciju na područje izvan raspoloživih podataka potrebno je provesti transformaciju u logaritamsko mjerilo. Na taj način funkcija raspodjele

prikazana je u obliku pravca, te se je jednoznačno moguće provesti ekstrapolacija podataka.

Nakon što se definira funkcija raspodjele vjerojatnosti, za bilo koje povratno razdoblje vrijednosti značajne valne visine povratnog razdoblja *PR* [god] jednostavno se definira izrazom

$$P(\hat{H}_{s} \ge H_{s}^{PR}) = \frac{T_{reg}}{n} \cdot \frac{1}{PR}$$
(4-2)

u kojem je T_{reg} razdoblje neprekidnog opažanja iz kojeg je dobiven uzorak.

4.1 Dugoročna valna klima – Jadranski model

Dugoročna valna klima na Jadranskom modelu definirana je na temelju kratkoročnih prognoza dobivenih jadranskim numeričkim modelom iz podataka o vjetru dobivenih prognostičkim modelom ALADIN u razdoblju od 1992.–2001. Budući da se raspolaže podacima o vjetru, pa tako i značajnim valnim visinama relativno kratkog vremenskog razdoblja odabrana je prognoza formiranjem niza prekoračenja po smjerovima.

Prognoza je provedena za povratna razdoblja od 5 do 100 godina, no obzirom na raspoložive podatke o polju vjetra iz razdoblja od "samo" 10 godina korektnima se mogu smatrati prognoze povratnog razdoblja do 30 godina.

Prognoze većih povratnih razdoblja izvedene su zbog usporedbe s rezultatima lokalnog modela i mogućnosti praćenja razvoja prognoza u budućnosti, kada se očekuje raspoloživost duljeg niza podataka o vjetru.

U poglavlju 3.1 opisan je način odabira analiziranih situacija vjetra na temelju kojih je provedena prognoza dugoročne valne klime promatrajući područje Jadrana podijeljeno na tri dijela – sjeverni, srednji i južni. Nadalje, za tako definirane prognoze, po tri za svaki smjer i za svako definirano povratno razdoblje, određene su maksimalne vrijednosti u pojedinim elementima polja te su tako definirane karte valne klime Jadrana ovisno o smjeru širenja valova za različita povratna razdoblja. Prognozirana valna polja na području Jadrana po smjerovima za povratno razdoblje 30 godina prikazana su na slikama 4-1 do 4-8. Valna polja definirana za ostala povratna razdoblja (10, 20 i 50 godina) prikazana su u Dodatku E.



Slika 4-1 Karta valova smjera N povratnog razdoblja 30 godina na području Jadrana



Slika 4-2 Karta valova smjera NE povratnog razdoblja 30 godina na području Jadrana



Slika 4-3 Karta valova smjera E povratnog razdoblja 30 godina na području Jadrana



Slika 4-4 Karta valova smjera SE povratnog razdoblja 30 godina na području Jadrana Napomena: Karta valova iz smjera SE, radi jasnijeg prikaza, dana je u različitoj skali od ostalih smjerova.



Slika 4-5 Karta valova smjera S povratnog razdoblja 30 godina na području Jadrana



Slika 4-6 Karta valova smjera SW povratnog razdoblja 30 godina na području Jadrana



Slika 4-7 Karta valova smjera W povratnog razdoblja 30 godina na području Jadrana



Slika 4-8 Karta valova smjera NW povratnog razdoblja 30 godina na području Jadrana

U ovom radu dobivene značajne valne visine povratnog razdoblja 30 godina na području Jadrana prikazane na slikama 4-1 do 4-8 u nastavku su, radi preglednosti, prikazane tablično (tablica 4-1) po smjerovima i po područjima Jadrana (sjeverni, srednji i južni Jadran) interpretirane karakterističnim točkama najvećih značajnih valnih visina pojedinih područja bliže hrvatskoj obali.

SMJER		Ν	NE	Е	SE	S	SW	W	NW
Hs[m]	SJEVERNI JADRAN	4,25	4,50	4,50	6,50	3,25	4,00	3,75	3,00
	SREDNJI JADRAN	5,00	4,50	3,00	8,50	3,75	3,50	4,50	3,50
	JUŽNI JADRAN	3,25	5,00	3,00	8,50	4,00	5,50	4,50	3,00

Tablica 4-1 Rezultati dugoročne jadranske valne klime po smjerovima i područjima za povratno razdoblje 30 godina

Usporedbom dobivenih rezultata i ranije objavljenih analiza Pršić i Smirčić može se zaključiti da su dobivene dobre prognoze.

Naime tijekom promatranih 6 godine mjerenja na stanici Panon u sjevernom Jadranu zabilježene su značajne valne visine smjera bure između 2 i 3 metra, s dvije situacije visine 4,0m, dok je u ovdje definiranoj dugoročnoj valnoj klimi na istoj lokaciji prognozirana značajna valna visina povratnog razdoblja 30 godina 4,5m. Isto tako bilježi se i pojava maksimalne valne visine smjera bure 7,2m, što uz pretpostavku $H_{\rm max} = 1,85H_s$ povlači značajnu valnu visinu 3,9m. Iz smjera juga značajne valne visine na stanici Panon su nešto veće i iznose prosječno između 2,5 i 3,5m, dok je zabilježena i značajna valna visina 7,54m.

U ranijim radovima prognozirana značajna valna visna povratnog razdoblja 50 godina, na sjevernom Jadranu, neovisno o smjeru, je 7,9m, dok je u ovom radu definiranom dugoročnom prognozom za smjer SE značajna valna visina 50 godišnjeg povratnog razdoblja 7,0m.

Na južnom Jadranu ranijim radovima (Pršić, Smirčić) definirane značajne valne visine povratnog razdoblja 50 godina, neovisno o smjeru, iznose 7,2m, dok u ovom radu definirane veličine iznose oko 9,0m.

Prema tome model kalibriran na temelju jedne mjerne postaje na sjevernom Jadranu, u usporedbi s ranijim istraživanjima, daje podcijenjene rezultate na sjevernom, a precijenjene na južnom Jadranu. Logično se nameće potreba za verifikacijom modela novim mjernim postajama na otvorenim područjima Jadrana, posebno južnom i srednjem Jadranu.

4.2 Dugoročna valna klima – lokalni model

Dugoročna prognoza za područje lokalnog modela definirana je u dva slučaja:

- Na temelju podataka iz prognostičkog modela ALADIN (podacima o vjetru iz kojih su definirane kratkoročne prognoze tijekom 10 godina) definirana do povratnog razdoblja 50 godina.
- Na temelju podataka s mjernih postaja (raspolaže se podacima o vjetru s mjernih postaja u trajanju preko 40 godina) definirana do povratnog razdoblja 100 godina, ali samo za neke smjerove.

4.2.1 Dugoročna valna klima na temelju podataka o vjetru iz prognostičkog modela ALADIN

Dugoročna valna klima za lokalni model definirana na temelju podataka o vjetru iz prognostičkog modela ALADIN formirana je na isti način kao i dugoročna valna klima Jadranskog modela, kako je prikazano u poglavlju 4.1.





Slika 4-9 Karta valova smjera N povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vjetru ALADIN



Slika 4-10 Karta valova smjera NE povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vjetru ALADIN



Slika 4-11 Karta valova smjera E povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vjetru ALADIN



Slika 4-12 Karta valova smjera SE povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vjetru ALADIN



Slika 4-13 Karta valova smjera S povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vjetru ALADIN



Slika 4-14 Karta valova smjera SW povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vjetru ALADIN



Slika 4-15 Karta valova smjera W povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vjetru ALADIN



Slika 4-16 Karta valova smjera NW povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model – podaci o vjetru ALADIN

4.2.2 Dugoročna valna klima na temelju podataka o vjetru s mjernih postaja

Dugoročna valna klima na lokalnom modelu provedena je na temelju kratkoročnih prognoza dobivenih lokalnim numeričkim modelom na temelju podataka o vjetru definiranih modelom distribucije brzine vjetra s mjerne postaje Split-Marjan na cijelo područje modela. Podaci s mjerne postaje Split-Marjan raspoloživi su u dugogodišnjem nizu (1966-2007) te je za prognozu odabrana metoda godišnjih ekstrema po smjerovima.

Zbog potreba daljnje analize, optimizacije obloge nasipnih zaštitnih građevina definirana je valna klima povratnih razdoblja u rasponu od 5 do 100 godina, a rezultati su prikazani na slikama u nastavku. Karte smjerova SW, W i NW nisu definirane jer je kritička analiza pokazala da definirana metoda za te smjerove nije primjenjiva.



Slika 4-17 Karta valova smjera N povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model



Slika 4-18 Karta valova smjera N povratnog razdoblja 100 godina – lokalni model



Slika 4-19 Karta valova smjera NE povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model



Slika 4-20 Karta valova smjera NE povratnog razdoblja 100 godina - lokalni model



Slika 4-21 Karta valova smjera E povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model



Slika 4-22 Karta valova smjera E povratnog razdoblja 100 godina – lokalni model



Slika 4-23 Karta valova smjera SE povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model



Slika 4-24 Karta valova smjera SE povratnog razdoblja 100 godina – lokalni model



Slika 4-25 Karta valova smjera S povratnog razdoblja 30 godina – lokalni model



Slika 4-26 Karta valova smjera S povratnog razdoblja 100 godina – lokalni model

4.2.3 Usporedba rezultata dobivenih korištenjem različitih ulaznih podataka o vjetru

Lokalni model dugoročne valne prognoze na temelju podataka o vjetru iz prognostičkog modela atmosfere ALADIN daje različite rezultate od lokalnog modela dugoročne prognoze na temelju podataka o vjetru s okolnih mjernih postaja. Obzirom da je model mjernim postajama verificiran za smjer juga i bure u oba modela, rezultati dobiveni dugoročnom prognozom za smjerove bure i juga razlikuju se kvantitativno, obzirom na pretpostavku kontinuiranog smjera nad poljem, što za posljedicu ima znatno više prognozirane valne visine po modelu vjetra s mjernih postaja, dok se za ostale smjerove koje karakterizira česta promjena smjera i brzine vjetra rezultati bitno razlikuju i kvalitativno.

Od ova dva modela, lokalni model na temelju podataka o vjetru prognostičkog modela ALADIN je vjerodostojniji što je prikazano u ranijim analizama usporedbom s mjerenjima na valografu. To je i logično obzirom da je prognostičkim modelom definirano polje vjetra prilično realno u odnosu na model sa sintetičkim poljem vjetra definiranim jednom ili par točaka (meteoroloških postaja).

Prema prethodnim analizama pojedinih situacija i njihovom usporedbom s mjerenim valnim visinama u poglavlju 3.2.5 može se zaključiti da je model definiranja vjetrovnog polja za smjerove NE i SE jednako kvalitetan kao i model definiran podacima o vjetru iz ALADINa na području dovoljno blizu same mjerne postaje Split-Marjan.

Prema tome relativno velika razlika u dugoročnim valnim poljima može se objasniti nerealnom pretpostavkom modela formiranog prema podacima s mjernih postaja da vjetar kontinuirano puše nad cijelim poljem istim smjerom što povlači znatno veće valne visine na otvorenim djelovima akvatorija. Očigledno, model je potrebno poboljšati uključivanjem mogućnosti variranja smjera vjetra i smanjivanjem područja koje pokriva odabrana mjerna postaja. Nažalost, obzirom na broj postaja s dugoročnim mjerenjima time bi se znatno smanjila mogućnost primjene prikazane metodologije.

5 Dimenzioniranje primarne obloge nasipnih zaštitnih građevina (stanje područja)

Proračun konstrukcije nasipnih zaštitnih konstrukcija vrlo je složen i sastoji se od niza proračuna kojima je cilj definiranje optimalne veličine građevine. U tom postupku mogu se mijenjati lokacija, trasa, tip presjeka i projektno stanje mora. Da bi se analiza određenog tipa presjeka mogla provesti općenito, neovisno o lokaciji, potrebno je varirati projektno stanje mora i dubinu, te minimizirati troškove gradnje i održavanja. Upravo takva optimizacija provedena je u ovom radu. Prije svih proračuna potrebno je definirati dubokovodnu valnu klimu različitih povratnih razdoblja, što je provedeno u prethodnom poglavlju. Na temelju tako definirane valne klime Jadrana, slijedi definiranje plitkovodne valne klime i odabir parametara odluke, odnosno odabir povratnog razdoblja mjerodavnog stanja mora. Također potrebno je obratiti pažnju i na niz ograničenja koja se mogu javiti, kao na primjer geometrija profila, dostupni materijali i tehnologija građenja. Zatim je potrebno uvažavajući predviđena ograničenja pretpostaviti dimenzije i provjeriti stabilnost pojedinih elemenata obloge pokosa i nožice, eroziju dna, provjeriti opću stabilnost nasipa, ispitati nosivost tla i dopuštena slijeganja. Obzirom na prevladavajuće kameno dno na jadranskoj obali problemi sloma tla i slijeganja u ovom radu neće se analizirati.

U ovom radu pažnja će se posvetiti proračunu stabilnosti obloge. Tradicionalno obloga se dimenzionira na projektne valove 50 do 100 godišnjeg povratnog razdoblja čime se uporabni vijek konstrukcije izjednačava sa ekstremnim projektnim uvjetima, što u pravilu ne povlači optimalno rješenje presjeka nasipnih građevina. Pri tome jedino opterećenje koje se javlja kod zaštitnih građevina je valno opterećenje, te nije potrebno analizirati razne slučajeve opterećenja i vjerojatnost istovremenog pojavljivanja.

Konkretno istraživanje prikazano u poglavlju 7 provedeno je na obostrano nasipnom lukobranu bez upotrebne krune smještenom na dubini 10 do 15m, te će i prikaz u nastavku biti fokusiran na upravo taj tip zaštitnih građevina. (slika 5-1).



Slika 5-1 Tipični poprečni presjek nasipnog lukobrana u dubokom



Slika 5-2 Tipični poprečni presjek nasipnog lukobrana u plitkom

5.1 Projektiranje poprečnog presjeka nasipnih građevina

Istraživački centar pomorskih inženjera američke vojske odredio je tipični poprečni presjek lukobrana (slike 5-1 i 5-2) (CERC,1977.). Većina poprečnih presjeka lukobrana napravljena je prema ovim smjernicama, iako manje promjene u presjeku mogu ovisiti o konkretnim uvjetima na terenu.

Osnovni parametri projektiranja kod definiranja osnovnih dimenzija poprečnog presjeka su: visina i širina krune, primarna obloga, sekundarna obloga, unutarnji slojevi, debljina slojeva i broj elemenata obloge, jezgra i temeljni sloj. Na prikazanim slikama prosječna veličina kamena za svaki sloj izražena je kao udio težine pojedinačnog elementa obloge površinskog sloja, *W*. Gradacija veličine svakog sloja dana je kao postotak prosječne veličine kamena definiranog promjerom *D*. Ispiranje manjih frakcija iz unutrašnjih slojeva spriječeno je poštivanjem filtarskog pravila:

 $5D_{85}$ (unutarnji sloj) > D_{15} (gornji sloj)

(5-1)

gdje su D_{85} i D_{15} promjeri 85%-tnog i 15%-tnog udjela čestica.

Bruun i Johannessen (1976.) zagovarali su promjene u standardnom profilu lukobrana. Predlagali su optimizaciju nagiba lukobrana s obzirom na djelovanje valova na njegovim pojedinim dijelovima. Budući da bi nagib trebao biti blaži gdje su djelovanja veća, predlagali su da se nagib prilagodi tako da se zaravna u ravnini mirne morske razine (MMR) (lukobrani s bermom). Nagib ispod mirne razi prema njihovim preporukama trebao bi biti relativno strm da bi se smanjio početni utjecaj loma valova. Ovaj pristup najbolje odgovara područjima s ograničenim utjecajem plime.

Visina i širina krune

Visina krune definira se preko mirnog raza i pretpostavljenog izdizanja dolaznog vala. Proračun visine krune je iz grupe proračuna funkcionalnosti te se projektna valna visina odabire na odgovarajući način. Prelijevanje krune lukobrana općenito se dopušta ukoliko ne generira štetne valove u području zaštićenom konstrukcijom.

Minimalna širina krune prema CERC-u (1977.) jednaka je iznosu širine tri elementa obloge. Može se proračunati kao:

$$B = nk_{\Delta} \left(\frac{W}{\gamma_r}\right)^{1/3}$$
(5-2)

gdje je *B* širina krune, *n* broj elemenata obloge (*n*=min *3*), k_{Δ} koeficijent sloja, *W* težina pojedinačnog elementa primarne obloge i γ_r jedinična težina elementa obloge.

Primarni sloj obloge

Na Jadranu je uobičajena ugradnja kamenih blokova primarne obloge, obzirom na projektne valne visine i dostupnost kamenog materijala, ali u svijetu je raširena izvedba betonskih blokova primarne obloge.

Težina pojedinačnog elementa vanjskog sloja primarne obloge, *W*, računa se prema nekoj od formula prikazanih u poglavlju 5.2. CERC (1977.) predlaže debljinu od minimalno 2 elementa na vanjskom sloju. Težina elementa obloge može se smanjiti na dubini većoj od *1.5H* ispod MMR (pri čemu je *H* projektna valna visina) zato što su sile koje djeluju na pokos lukobrana na većim dubinama manje od onih bližih razini vode. Projektiranje površinskog sloja zaštićene strane pokosa ovisi o količini prelijevanja, silama koje mogu direktno djelovati na taj pokos lukobrana, poroznosti konstrukcije i silama koje mogu pomaknuti elemente obloge (CERC, 1977.). Kod pojave prelijevanja, Magoon, Sloan i Foote (1974.), upozoravaju na popuštanje obloge sa zaštićene strane lukobrana te naglašavaju da je potrebno ugrađivati oblogu jednakih dimenzija kao i s morske strane.

U sličnom uvjetima valnog djelovanja, oštećenja glave lukobrana su veća i češća od oštećenja tijela. CERC (1977.) preporuča oblaganje glave u iznosu 15-45m od kraja konstrukcije i s izložene i sa zaštićene strane. Točna duljina oblaganja ovisi o duljini konstrukcije i visini krune.

Sekundarni sloj obloge

Kada se lukobran nalazi u plitkom području primarni sloj obloge pokriva cijeli pokos s morske strane. U dubokom moru sekundarni sloj građen od lakših jedinica može biti ugrađen umjesto primarnog sloja na većim dubinama kod kojih je valno djelovanje smanjeno. Prosječna težina elementa sekundarnog sloja obloge koji se postavlja na dubinu između -1,5H i -2.5H definira se približno kao W/2, gdje je W težina pojedinačnog elementa primarne obloge, a na većim dubinama, uz pretpostavku konstantnog nagiba pokosa, približno W/15 (CERC, 1977.).

U ovom postupku reduciranja veličine elementa obloge, broj slojeva obloge *n* potrebno je povećati kako bi se zadržala debljina jednaka debljini primarnog sloja obloge radi sprječavanja klizanja. Moguća je i kombinirana izvedba kod koje je primarni sloj izgrađen od betonskih elemenata, dok je sekundarni sloj od kamena. Tada je bitno da se težina elemenata sekundarnog sloja određuje na osnovu potrebne težine kamena da bi primarni sloj bio stabilan, W_{eq} , a ne na osnovu stvarne težine betonskih jedinica, W (ASCE,1969.).
Unutarnji (filterski) slojevi

Uobičajeno je da se za filterske slojeve koristi lomljeni kamen. Pri tome pojedini komadi trebaju biti dovoljno veliki da se spriječi njihovo ispiranje kroz praznine u površinskim slojevima. Svaki unutarnji sloj treba biti minimalne debljine jednake debljini dvostruko postavljenih komada prema niže definiranim težinama.

Prema filtarskom pravilu, težina kamena u prvom unutarnjem sloju, W_1 , treba biti približno W/20. Po Hudsonovoj preporuci, 1974., obično se uzima da je težina kamena otprilike W/10 da bi se boljim uklještenjem s površinskim slojevima spriječile veće praznine i smanjio tlak koji djeluje na površinske slojeve. Carter (1980.) je došao do zaključka da varijacije u težini prvog primarnog sloja od W/5 i W/20 nemaju značajniji utjecaj na stabilnost obloge. Kriterij da težina iznosi W/10 koristi se kada elementi obloge imaju koeficijent stabilnosti $K_D \leq 12$ (posebni tipovi betonskih elemenata).

Prema Hudsonovoj formuli za proračun težine bloka primarne obloge, budući koeficijent stabilnosti za betonske elemente raste, potrebna veličina obloge, *W*, opada. Koristeći kriterij da je težina elementa jednaka $W_{eq}/10$, veličina kamena bila bi prevelika u usporedbi s veličinom manjih betonskih elemenata. Hudson (1974. i CERC (1977.) zato preporučaju da se prvi filterski sloj ispod elemenata obloge čiji je $K_D>12$ odredi prema izrazu W_1 =W/5.

Kod poprečnog presjeka gdje ne dolazi do loma valova, slika 5-1, dio prvog filterskog sloja ispod razine -1.5H bi trebao iznositi otprilike 1/20 težine sekundarnog površinskog sloja ($W_1=1/20\cdot W/15=W/300$).

Kamen u drugom i svakom sljedećem unutranjem sloju trebao bi iznositi W/20 težine sloja iznad što znači $W_2=W_1/20$, $W_3=W_2/20$, itd.

Graduiranost

Materijal unutarnjih slojeva može biti do neke mjere graduiran, pri tome bi kamen u prvom unutarnjem sloju trebao biti minimalno graduiran, dok sljedeći slojevi mogu biti sastavljeni od šireg spektra veličina kamena (Hudson, 1974.) (slike 5-1 i 5-2).

Debljina sloja i broj elemenata obloge

Kada su poznati eksperimentalno određeni koeficijenti, debljina sloja i broj elemenata obloge može se odrediti sljedećim izrazima:

$$r = nK_D \left(\frac{W}{\gamma_r}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\frac{N_r}{A} = nK_D \left(1 - \frac{p}{100}\right) \left(\frac{\gamma_r}{W}\right)^{\frac{2}{3}}$$
(5-3)
(5-4)

gdje je *r* prosječna debljina *n* slojeva elemenata obloge težine *W* i specifične gustoće γ_r , N_r potreban broj elemenata obloge za određenu površinu *A*, K_D koeficijent obloge i *p* prosječna poroznost sloja. Raspon vrijednosti K_D i *p* varira ovisno o vrsti, obliku i načinu slaganja elemenata obloge. U tablici 5-3 prikazane su neke eksperimentalno dobivene vrijednosti (Hudson, 1974.).

Projektanti trebaju proračunat ukupan broj potrebnih elemenata obloge da bi se provjerila stabilnost i približno odredila cijena obloge. Carver i Davidson (1977.) proveli su test na oblozi tipa dolos da bi proučili utjecaj smanjenja broja elemenata obloge u površinskom sloju na stabilnost konstrukcije. Istraživanje je pokazalo da je smanjenje potrebnog broja elemenata obloge za 25% smanjilo koeficijent stabilnosti za 50%.

Jezgra

Materijal jezgre može težiti od W/6000. Opći kameni nasip je najčešće korišten materijal jezgre lukobrana, ali se koriste i šljunak, pijesak i glina. Unutranji sloj koji pokriva jezgru treba biti takav da se izbjegne ispiranje matrijala jezgre kroz šupljine. Visina i propusnost jezgre može utjecati na stabilnost lukobrana. Visoke, nepropusne jezgre povećavaju refleksiju valova i hidrostatski tlak, što može uzrokovati podižuće sile ispod obloge (ASCE, 1969.).

5.2 Hidraulička djelovanja

U procesu projektiranja nasipnih zaštitnih građevina potrebno je analizirati utjecaj okoliša, hidrauličke parametre, geotehničke parametre i parametre same konstrukcije. U ovom radu naglasak je na hidrauličkim djelovanjima kao dominantnim u postupku optimizacije veličine obloge, pa se analize ostalih parametara neće provoditi. Fizikalni procesi uključeni u hidrauličku analizu nasipnih pomorskih građevina su izdizanje i poniranje vala (*wave run-up, wave run-down*), prelijevanje, transmisija i refleksija (slika 5-3). U nastavku je ukratko opisan svaki od ovih procesa.

Pri tome, najčešće korišten parametar kod opisa djelovanja vala i njegovih utjecaja na pokos nasipnih građevina je parametar loma, ξ ili Iribarrenov broj, *Ir* definiran izrazom

 $\xi = \tan \alpha / \sqrt{s}$ (5-5) gdje je α nagib pokosa, a *s* strmost vala. Ovaj parametar često se koristi za opis tipa loma na konstrukciji (slika 5-4). U nastavku se koristi nekoliko verzija ovog parametra ovisno o strmosti, odnosno periodu na koji su vezani.



Slika 5-4 Tipovi loma na pokosu i pripadni parametar loma

5.2.1 Izdizanje i poniranje vala (*wave run-up, run-down*)

Djelovanje valova na nasipnu građevinu izazvat će osciliranje vodnog lica u vertikalnom smjeru, općenito, veće od dolazne valne visine. Ekstremne vrijednosti za svaki val, izdizanje, R_u , i poniranje, R_d definiraju se relativno obzirom na mirnu morsku razinu (MMR) te je izdizanje vala pozitivno ako prelazi MMR, a poniranje je pozitivno ako je ispod MMR.

Određivanje parametara R_{μ} i R_{d} temelji se na jednostavnim empirijskim jednadžbama, potvrđenim modelskim ispitivanjima ili numeričkim modelima međudjelovanja valova i konstrukcije. Jednodimenzionalni model valnog izdizanja razvili su Kobayshi i Wurjanto (1989., 1990.), Van Gent (1993.) i Engering i sur. (1993.). Dvodimenzionalni model razvio je Van der Meer i sur. (1992.). De Wall i Van der Meer (1992.) objavili su konačne rezultate niza ispitivanja na fizikalnim modelima različitih konstrukcija, izraze za proračune i potrebne dijagrame kod projektiranja.

Izdizanje i poniranje u pravilu se određuju bezdimenzionalnim vrijednostima oblika $\frac{R_{ux}}{H_s}$ i $\frac{R_{dx}}{H_s}$ pri čemu indeks x predstavlja stupanj premašenja relativnog izdizanja ili poniranja u postocima.

Opća formula za konstrukcije s glatkim pokosima dana je izrazom

$$\frac{R_{u2\%}}{H} = 1.5\gamma\xi_P \qquad \text{s maksimumom od } 3.0\gamma \qquad (5-6)$$

gdje je H_x značajna valna visina, γ faktor redukcije različitih utjecaja kao što su berma, hrapavost, plitko područje (TAW, 1974.), ξ_{P} parametar loma valova koji se odnosi na vršni period (T_p) .

Ipak, kod korištenja formule 5-6 potrebno je dodati faktor sigurnosti pa se preporuča korištenje izraza:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_s} = 1.6\gamma\xi_P \qquad \text{s maksimumom od } 3.2\gamma \qquad (5-7)$$

Daljnja istraživanja Van der Meera i Stama (1992.) dala su formule za određivanje izdizanja valova na kamenim pokosima. Prve tri formule određuju izdizanje vala preko parametra sličnosti loma valova i određenih koeficijenata (a,b,c,d) definiranih za različite stupnjeve x (tablica 5-1), izrazi 5-8 i 5-9 dani su za nepropusne konstrukcije ($P \le 0,4$), a izraz 5-10 za propusne konstrukcije (P > 0,4):

$$\frac{R_{ux}}{H_s} = a\xi_m \qquad \text{za } \xi_m < 1.5$$
(5-8)

$$\frac{R_{ux}}{H_s} = b\xi_m^c \qquad \text{za } \xi_m > 1,5 \tag{5-9}$$

$$\frac{R_{ux}}{H_s} = d$$
 za $\xi_m = 1,5$ (5-10)

gdje je za ξ_m parametar loma valova koji se odnosi na srednji period (T_m).

Razina izdizanja	а	b	С	d
0,1%	1,12	1,34	0,55	2,58
1%	1,01	1,24	0,48	2,15
2%	0,96	1,17	0,46	1,97
5%	0,86	1,05	0,44	1,68
10%	0,77	0,94	0,42	1,45
značajna	0,72	0,88	0,41	1,35
srednja	0,47	0,60	0,34	0,82

Tablica 5-1 Koeficijenti *a*, *b*, *c*, *d* za razine premašenja *i=0,1%, 1%, 2%, 5%, 10%,* značajnu i srednju razinu izdizanja kod kamenih pokosa

Također dana je formula koja određuje izdizanje vala preko Weibullove distribucije:

$$R_{up} = b(-\ln p)^{\frac{1}{c}}$$
(5-11)

gdje je *p* vjerojatnost (iznosi od 0 do 1), R_{up} razina izdizanja premašenja *p**100%, *b* parametar veličine, *c* parametar oblika.

Parametar b može se odrediti preko izraza:

$$\frac{b}{H_s} = 0.4 s_{om}^{-0.25} \cot \alpha^{-0.2}$$
(5-12)

gdje je s_{om} strmost vala.

Parametar c određuje oblik krivulje i kada je c=2 zadržana je Rayleighijeva distribucija. Određuje se preko izraza:

za prebačene valove:

$$c = 3.0\xi_m^{-0.75}$$
, za $\xi_m < \xi_{mc}$ (5-13)

• za prolom vala: $c = 0.52P^{-0.3}\xi_m^P \sqrt{\cot \alpha}$, za $\xi_m \ge \xi_{mc}$ (5-14)

gdje je P koeficijent propusnosti (slika 5-6).

Prijelaz između prebačenih valova i proloma valova (slika 5-4) može se proračunati preko kritične vrijednosti prema izrazu:

$$\xi_{mc} = \left(6.2P^{0.31}\sqrt{\tan\alpha}\right)^{1/(P+0.5)}$$
(5-15)

Formula pokriva nagibe gdje je *cotα* između 1,5 i 6.

Poniranje vala također ovisi o propusnosti konstrukcije i parametru sličnosti loma valova. Van der Meer (1988) je odredio i formulu za određivanje poniranja vala na kamenim pokosima oblika

$$\frac{R_{d_{2\%}}}{H_s} = 2.1\sqrt{\tan\alpha} - 1.2P^{0.15} + 1.5e^{-60s_{om}}.$$
(5-16)



Slika 5-6 Koeficijent propusnosti u ovisnosti o tipu konstrukcije

5.2.2 Prelijevanje

Kada je ekstremna vrijednost izdizanja vala viša od kote krune lukobrana doći će do prelijevanja. To će se u pravilu desiti relativno rijetko tijekom životnog vijeka konstrukcije i neće imati značajnije posljedice na samu konstrukciju i njome štićeno područje. Stoga se zaštitne građevine u pravilu dimenzioniraju na mogućnost pojave ograničenog prelijevanja čije su vrijednosti definirane ovisno o vrsti zaštitne građevine i njenoj namjeni.

Izračun količine prelijevanja za pojedine geometrije konstrukcije, razine vode i valne karakteristike temelji se na empirijski dobivenim jednadžbama prilagođenim rezultatima hidrauličkih modela. Poznata i široka primjena definirana je za nasipne građevine s i bez berme bez zida na kruni (Owen, 1980.). Nešto uže studije koje obuhvaćaju manji broj različitih slučajeva objavili su TAW (1974.), Brandbury i sur. (1988.), Aminthi i Franco (1988.) i De Waal i Van der Meer (1992.). Svaki od ovih radova razvio je bezdimenzionalne parametre za primjenu u formulama predviđanja prelijevanja, ali najjednostavniji parametar je relativna izložena površina, $R = \frac{R_c}{H_s}$, koja izostavlja važne utjecaje kao što su valni period, strmost vala i nagib pokosa.

Za obične i glatke pokose s bermom, Owen (1980.) je bezdimenzionlani parametar količine protoka *Q*, povezao s bezdimenzionlanom vrijednošću parametra izloženosti *R* preko jednadžbe:

$$Q = ae^{-bR/\gamma}$$
(5-17)

gdje su Q i R definirani izrazima:

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} \sqrt{\frac{s_{om}}{2\pi}}$$
(5-18)
$$R = \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_{om}}{2\pi}}$$
(5-19)

a parametri a i b definirani u tablici 5-2.

Nagib pokosa	а	b
1:1	0,00794	20,12
1:1,5	0,0102	20,12
1:2	0,0125	22,06
1:3	0,0163	31,9
1:4	0,0192	46,96
1:5	0.025	65.2

Tablica 5-2 Koeficijenti a i b koji se koriste u izrazu 5-16 u slučaju glatkih pokosa (Owen, 1980.)

De Waal i Van der Meer (1992.) koristili su Owenova (1980.) i Führbötherova (1989.) istraživanja, a i svoja mjerenja da bi odredili izraze za određivanje količine prelijevanja. Koristili su dva pristupa: u prvom su promatrali prelijevanje u ovisnosti s izdizanjem valova, a u drugom su prelijevanje promatrali kao zasebnu pojavu. Iz njihovih istraživanja došlo se do zaključka da bezdimenzionlanu vrijednost prelijevanja treba podijeliti na situacije s lomljenim, Q_b , i nelomljenim, Q_n , valovima. Dobivene jednadžbe glase:

$$Q_{b} = \frac{q}{\sqrt{gH_{s}^{3}}} \sqrt{\frac{s_{op}}{\tan \alpha}}, \qquad R_{b} = \frac{R_{c}}{H_{s}} \frac{\sqrt{s_{op}}}{\tan \alpha} \frac{1}{\gamma}$$
(5-20)

$$Q_n = \frac{q}{\sqrt{gH_s^3}}, \qquad R_n = \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma}$$
(5-21)

gdje su R_b i R_n bezdimenzionalne visine krune, a γ faktor redukcije.

Postoji veoma malo podataka koji opisuju pojavu prelijevanja kod kamenih lukobrana bez zaštite krune. Ipak, Bradbury i drugi (1988.) su dali procjenu utjecaja valnih karakteristika i relativne izloženosti. Njihova formula za prelijevanje glasi:

$$\frac{Q}{\sqrt{gH_s^3}}\sqrt{\frac{s_{om}}{2\pi}} = a \left(\left(\frac{R_c}{H_s}\right)^2 \sqrt{\frac{s_{om}}{2\pi}} \right)^{-b}$$
(5-22)

gdje su vrijednosti *a* i *b* određene iz rezultata mjerenja na pokosima obloženim kamenom nagiba 1:2 definiranim za pojedine tipove presjeka lukobrana u ovisnosti o nagibu pokosa i omjeru širine krune i značajne valne visine (ne odgovaraju parametrima prikazanimu tablici 5-2).

5.2.3 Transmisija

Kod zaštitnih građevina relativno propusne konstrukcije valna energija će se kroz tijelo građevine prenijeti u područje iza lukobrana. Količina transmisije ovisi o geometriji konstrukcije, izloženosti i širini krune, dubini vode, propusnosti i valnim karakteristikama (valnoj visini i valnom periodu). Istraživanjima transmisije na hidrauličkim modelima bavili su se Seeling (1980.), Powell i Allsop (1985.), Daemrich i Kahle (1985.), Ahrens (1987.) i Van der Meer (1988.), a Van der Meer je 1990. obuhvatio sva navedena istraživanja i definirao jedinstvenu metodu za predviđanje transmisije ovisno o području primjene kako je prikazano izrazima 5-23 do 5-25.

$$-2.0 < \frac{R_c}{H_s} < -1.13 \qquad C_t = 0.80 \qquad (5-23)$$

$$-1.13 < \frac{R_c}{H_s} < 1.2 \qquad C_t = 0.46 - 0.3 \frac{R_c}{H_s}$$
(5-24)

$$1.2 < \frac{R_c}{H_s} < 2.0$$
 $C_t = 0.10$ (5-25)

gdje je C_t koeficijent transmisije.

Daemenova (1991.) istraživanja pokazuju linearnu ovisnost između koeficijenta transmisije i relativne visine krune R_0/D_{n50} , koja vrijedi u rasponu od minimalne do maksimalne vrijednosti C_i .

$$C_{t} = a \frac{R_{c}}{D_{n50}} + b$$
(5-26)

gdje su

$$a = 0.031 \frac{H_i}{D_{n50}} - 0.24 \tag{5-27}$$

$$b = -5.42s_{op} + 0.0323 \frac{H_i}{D_{n50}} - 0.0017 \left(\frac{B}{D_{n50}}\right)^{1.84} + 0.51 \text{ za konvencionalne lukobrane(5-28)}$$

pri tome vrijednost C_t iznosi od 0.075 do 0.75. Istraživanja su provedena na nekoliko grupa zaštitnih građevina, uz konstantnu strmost vala i konstantnu relativnu valnu visinu u rasponima $0.01 < s_{op} < 0.05$ i $1 < \frac{H_s}{D_{n50}} < 6$.

5.2.4 Refleksija

Valovi će se u određenom iznosu reflektirati od gotovo svake obalne konstrukcije. Kod strmih neporoznih konstrukcija reflektirati će se gotovo 100% valne energije dok će se kod kamenih pokosa koji apsorbiraju valnu energiju reflektirati znatno manja količina valne energije. Količina reflektirane energije definira se koeficijentom refleksije, C_r , koji definira omjer dolazne i reflektirane valne visine ili energije, redom H_i , H_r ili E_i , E_r

$$C_r = \frac{H_r}{H_i} = \sqrt{\frac{E_r}{E_i}}$$
(5-29)

Za glatke neporozne pokose, Battjes (1974.) je izveo formulu za određivanje refleksije,:

$$C_r = 0.1\xi^2$$
 (5-30)

dok Seelingova (1983.) formula glasi:

$$C_{r} = \frac{a\xi_{P}^{2}}{b + \xi_{P}^{2}}$$
(5-31)

gdje je a=1.0, b=5.5 za glatke pokose i a=0.6, b=6.6 približna procjena za hrapave propusne pokose.

Postma (1989.) je izveo izraz oblika:

$$C_r = 0.071 P^{-0.082} \cot \alpha^{-0.62} s_{op}^{-0.46}$$
(5-32)

uzimajući u obzir propusnost konstrukcije, nagib pokosa i valnu strmost.

5.3 Stabilnost obloge pokosa nasipnih lukobrana

Veličina obložnih blokova ovisi o valnoj visini, valnom periodu, kutu nailaska valova na konstrukciju, vrsti udara valova (s ili bez loma) itd. Isto tako ovisi i o karakteristikama same konstrukcije, kao što su oblik i nagib pokosa, položaj u konstrukciji (tijelo, glava, koljeno), visini, širini i tipu krune, obliku i uklještenosti blokova, načinu slaganja, gustoći mase materijala i vode, broju slojeva obloge, graduiranosti blokova, dubini postavljanja obloge, porozitetu konstrukcije, stupnju dopuštenog oštećenja i nizu drugih karakteristika.

U posljednjih 70-ak godina razvijen je niz metoda definiranja veličine bloka primarne obloge nasipnih zaštitnih građevina, a u ovom radu su prikazane neke od najvažnijih. Sve te formule temelje se na modelskim istraživanja relativno malih dimenzija, te su pod utjecajem mjerila. Općenito sve formule su dobre za preliminarne proračune, no netočnosti u samim formulama i uvjeti pod kojima su provedena ispitivanja trebaju se pažljivo uzimati u obzir. Za sve veće konstrukcije, preporuča se, prema novim pravilnicima modelska ispitivanja prije same gradnje.

U analizama se uglavnom promatra samostalni blok na pokosu za slučaj uspinjanja i spuštanja vala. Na blok djeluju vlastita težina, hidrostatski uzgon i dinamičke sile od valova: inercijalna sila i sila otpora tijela u struji tekućine, sila hidrodinamičkog uzgona, sila odizanja uslijed strujanja vode u jezgri i sila trenja među blokovima.

Kvalitativni odnos stabilnosti pojednostavljeno se može definirati kao odnos sila uzrokovanih valovima (F_D – sila otpora i F_L – sila odizanja) i sile uzgona F_G (CEM, 2006.):

$$\frac{F_D + F_L}{F_G} \approx \frac{\rho_w D_n^2 v^2}{g(\rho_a - \rho_w) D_n^3} = \frac{v^2}{g\Delta D_n}$$
(5-33)

gdje su ρ_w i ρ_a – gustoća vode i obloge, $\Delta = \left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right) - 1$ relativna gustoća elemenata obloge, D_n nazivni promjer elemenata obloge, v – trenutna brzina toka; kod lomljenih valova $v \approx \sqrt{gH}$.

Koeficijent stabilnosti je bezdimenzionalna veličina definirana u obliku

$$N_s = \frac{v^2}{g\Delta D_n} = \frac{H}{\Delta D_n}.$$
(5-34)

5.3.1 Irribarenova formula

Iribarren je 1938. analizu proveo samo uzimajući u obzir vlastitu težinu, hidrostatski uzgon, trenje među blokovima i silu otpora tijela u struji vode na pokosu. Iz tih analiza uz eksperimentalno određivanje pojedinih konstanti definirao je formulu za određivanje stabilnosti oblika:

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_n} = K(\tan\phi\cos\alpha \pm \sin\alpha)$$
(5-35)

gdje je ϕ kut nagiba temelja obloge, α kut nagiba pokosa konstrukcije i *K* koeficijent ovisan o obliku elemenata obloge i stupnju oštećenja.

5.3.2 Hudsonova formula

Hudsonova formula (1959.) izvedena je iz ranijih Iribarrenovih radova (1938.). Pretpostavljeno je da je vučna sila primarna sila koja djeluje na pomicanje pojedinačnih blokova obloge na pokosu, a da je glavna sila koja se opire tom pokretanju sila uzgona potopljenih elemenata obloge (1974.). Opći oblik formule koja definira težinu bloka primarne obloge je

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D (S_r - a)^b f(\alpha)}$$
(5-36)

gdje je *W* težina pojedinačnog elementa primarne obloge, *H* projektna valna visina, γ_r jedinična težina elementa obloge, K_D koeficijent stabilnosti obloge uz pretpostavku "bez oštećenja", što u stvari pretpostavlja oštećenje od 0–5%, S_r specifična težina elementa obloge, α kut nagiba pokosa izloženog moru mjeren od horizontale.

Formula 5-36, određena kroz mnoga testiranja, uključuje dva temeljna pojednostavljenja:

- visina krune testnih primjera je bila dovoljna da bi se spriječilo značajnije prelijevanje,
- projektne valne visine izabrane su tako da izazovu manje od 5% štete; tj. manje od 5% volumena elemenata obloge pri testiranju je bilo pomaknuto tako da je stabilnost uzorka netaknuta.

Formula široke primjene proizašla iz ovih ograničenja ima oblik:

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 ctg\alpha},$$
(5-37)

dok se koeficijent stabilnosti može pisati u obliku

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_n} = \left(K_D ctg\,\alpha\right)^{\frac{1}{3}}.$$
(5-38)

Pri korištenju ove formule treba uzeti u obzir sljedeća ograničenja (CERC,1997.):

- *W* je težina elemenata obloge približno uniformne veličine.
- Nagib površinskog sloja pokosa, α, je djelomično određen s obzirom na veličinu kamena. Formula je prihvatljiva za konstrukcije s uniformnim nagibom od 1:1.5 do 1:3.
- Formula se koristi za monokromatske valove koji nailaze pod pravim kutom na kontrukciju.
- Specifična težina elemenata obloge trebala bi biti između 19 i 28 kN/m³.
- Vrijednosti K_p ne bi trebale prelaziti preporučene.

Projektna valna visina

Kod primjene Hudsonove formule u izrazu definirana projektna valna visina nije striktno definirana no uobičajeno je koristiti desetinsku valnu visinu, $H_{1/10}$.

Izbor koeficijenta obloge

Bezdimenzionalni koeficijent obloge, K_D , predstavlja kombinaciju svih utjecajnih varijabli koje nisu direktno procijenjene u jednadžbi 5-36. Faktori s najznačajnijim utjecajem su: oblik elementa obloge, broj slojeva, način slaganja obloge, trenje i uklješetenje elemenata, oblik vala, dio konstrukcije (tijelo ili glava), kut nailaska vala. Nakon brojnih provedenih testiranja, došlo se do preporučenih vrijednosti koeficijenta K_D za razne slučajeve (tablica CERC II 7-206).

Ipak, postoje određena ograničenja pri korištenju tih vrijednosti:

- Preporuča se korištenje 2 sloja. Ako se koristi samo jedan sloj pri projektiranju se uzima manja vrijednost K_D, što odgovara većoj vrijednosti W. Pomicanje elemenata obloge od samo jednog sloja može izložiti potpovršinske slojeve i ugroziti cjelovitost površinskog sloja.
- Preporuča se korištenje koeficijenta K_D pri slučajnom slaganju jer je malo vjerojatno postići visok stupanj uklještenja na terenu, posebno pod morem.
- CERC (1977.) preporuča da nagib površinskog sloja ne bi trebao biti strmiji od 1:1.5.
- Valovi u laboratoriju su bili monokromatski i nisu simulirali realne valne uvjete.
- Podaci testiranja za lom valova su ograničeni. Vrijednosti koeficijenta *K*_D za te slučajeve dobivene su reduciranjem vrijednosti dobivenih za valove bez loma.
- Vrijednosti K_p za glavu lukobrana su manje od onih za tijelo zato što su valna djelovanja tu intenzivnija, a dolazi i do prelijevanja.

Pri projektiranju primarnog sloja za odabrane uvjete oštećenja obloge vrijednost koeficijenta K_D u konačnici ovisi o stupnju sigurnosti i stupnju rizika koje si projektant može dozvoliti.

Osvrt na primjenu Hudsonove formule

Hudsonova formula široko je prihvaćena u primjeni usprkos relativno velikom nizu pojednostavljenja i ograničenja. U nastavku je dana kritika same formule od strane raznih autora, no nitko od njih nije ponudio bolje ili za praksu prihvatljivije rješenje.

Mettam (1980.) smatra da razvoj betonskih elemenata obloge, koji se ponašaju drugačije od kamena, povećava ograničenja Hudsonove formule jer je trenje među elementima bitan faktor koji nije adekvatno uzet u obzir te da pri testiranju modela toj stavki treba posvetiti dodatnu pozornost. Naime, nove tehnologije omogućuju korištenje novih materijala pri izradi testnih modela, a to je bitno jer različito trenje mijenja smjer sila koje djeluju među elementima obloge u modelu i mijenja prirodni kut odziva, koji ima izražen utjecaj na stabilnost nagiba nasipa.

Gravesen, Jensen i Sorensen (1979.) smatraju da kvantifikacija površine trenja nije vrlo bitna u prototipu, ali da je bitna njena ekstrapolacija iz modela u stvarne vrijednosti.

Brorsen, Burcharth i Larsen (1974.) su pokazali neprikladnost korištenja empirijske jednadžbe za rješavanje stabilnosti obloge tipa dolos.

Brantzaeg (1966.) se fokusirao na utjecaj specifične težine materijala elemenata obloge i tekućine na stabilnost. Kada su jedinične težine ili prilično male ili prilično velike, predlaže da se formula modificira u oblik:

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D (S_r - \phi)^3 ctg\alpha}$$
(5-39)

gdje je ϕ promjenjiva veličina; i Brantzaeg preporuča vrijednost od 0.37 do 1.05.

Whillockovo i Priceovo (1976.) istraživanje pokazuje da je moguće da se poboljšanje stabilnosti neće dogoditi s blokovima koji su osjetljivi na vučnu silu. Stabilnost obloge tipa dolos pri nagibu 1:2 je opadala od okomitog nailaska vala do 60° te zatim izrazito brzo rasla. Smatra se, da kad val lomi pod kutom, da impulsno zapljuskivanje vode preko obloge kombinirano s velikim brzinama koje se javljaju uz pokos uzrokuju velike vučne sile. iznad 60° stabilnost se povećava zbog pojave refrakcije i redukcije valne visine. Stoga preporučuju da se nasipi s oblogom dolos projektiraju jedino za valne visine koje ne stvaraju štetu na lukobranu i pri okomitom nailasku valova.

Bruun i Gunbak (1976.) i Bruun i Johannesson (1976.) su proučavali ključnu ulogu valne frekvencije kod projektiranja kamenih nasipa. Prema njima, nije logično ignorirati karakteristike promjenjivog gibanja valova koje se događaju kod lukobrana pretpostavljajući konstantan koeficijent stabilnosti za cijeli valni period, kako je uzeto i u Hudsonovoj formuli. Predlaže se da se parametar loma vala ξ koristi za opis karakteristika valnog gibanja:

$$\xi = \frac{Tg\alpha}{\sqrt{H/L_o}}$$
(5-40)

gdje je *T* valni period, *g* gravitacijsko ubrzanje, α kut nagiba pokosa izloženog moru, mjeren od horizontale, *H* valna visina ispred lukobrana i L_0 duljina vala u dubokom moru

Maksimalno razorne sile na lukobranu javljaju se kod pojave rezonancije kada se dubinsko spuštanje vala dogodi istovremeno s obrušavajućim lomom vala na određenom dijelu lukobrana. Udar i podižuće sile koje djeluju na elemente obloge su maksimalne u blizini pojave rezonancije. Kod ove pojave, parametar ξ iznosi 2.0-3.0. Porast hidrostatskog tlaka unutar jezgre zbog povećanog utjecaja valova i smanjenja stabilnosti jezgre dovodi do povećanja parametra $\xi < 4.0$. Izdizanje i spuštanje vala povećava se progresivno i dostigne konstantnu vrijednost kod približno ξ >5.0.

Ostali faktori koji utječu na stabilnost lukobrana, a nisu adekvatno pokriveni u Hudsonovoj formuli su: varijacija valne duljine, trajanje oluje, slučajnost pojave samostalnih valova, stupanj prelijevanja, varijacije u dubini vode, druga vanjska opterećenja (vjetar, led).

5.3.3 Van der Meerova formula

Na temelju detaljnih istraživanja stabilnosti kamenih obloga izloženih nepravilnim valnim udarima koje su proveli Thompson i Shuttler (1975.) Van der Meer (1988.) je dodatnim analizama izveo povezanost između stupnja oštećenja, valnog perioda i trajanja djelovanja.

Na osnovu prethodno navedenih istraživanja, Van der Meer je izveo formulu za stabilnost kamenih obloga oblika:

• za prebačene valove (*plunging waves*):

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6.2P^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \xi_m^{-0.5}, \text{ za } \xi_m < \xi_{mc}$$
(5-41)

za prolom vala (surging waves):

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.0P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} \cdot \xi_m^P, \qquad \text{za } \xi_m \ge \xi_{mc}$$
(5-42)

gdje je P koeficijent propusnosti, S stupanj oštećenja, N broj valova koji djeluju na konstrukciju u tom periodu, α nagib pokosa lukobrana s izložene strane i H_s značajna valna visina. Odnos između nagiba konstrukcije, tana, i strmosti vala, $s_{om} = \frac{2\pi H_s}{gT^2}$,

opisuje Iribarrenov parametar ili parametar loma vala, ξ_m , (Battjes, 1974.):

$$\xi_m = \frac{T_m \tan \alpha}{\sqrt{2\pi H_s / g}} \tag{5-43}$$

gdje je T_m srednja vrijednost valnog perioda (određena iz spektra valnih zapisa), H_s značajna valna visina na nožici konstrukcije i g ubrzanje sile teže.

Vidal i drugi (2006.) preradili su Van der Meerovu formulu koristeći H_{50} definiranu kao prosječnu valnu visinu 50 najviših valova koji djeluju na konstrukciju u njenom životnom vijeku:

• za prebačene valove:

$$\frac{H_{50}}{\Delta D_{n50}} = 4.4P^{0.18}S^{0.2}\xi_m^{-0.5}, \quad \text{za } \xi_m < \xi_{mc}$$
(5-44)

za prolom vala:

$$\frac{H_{50}}{\Delta D_{n50}} = 0.716P^{-0.13}S^{0.2}\sqrt{\cot\alpha}\cdot\xi_m^P, \text{ za } \xi_m \ge \xi_{mc}$$
(5-45)

U plitkom moru, valna visina kod nožice lukobrana nije raspodjeljena po Rayleighovoj distribuciji. Van der Meer (1988a.) je za plitko područje uveo zamjenu H_s s $H_{2\%}$, gdje je $H_{2\%}$ valna visina koju premašuje 2% najviših valova. Za ne-Raylighovu distribuciju omjer $H_s/H_{2\%}$ iznosi 1.4, a izrazi 5-44 i 5-45 poprimaju oblik:

• za prebačene valove:

$$\frac{H_{2\%}}{\Delta D_{n50}} = 8.7P^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \xi_m^{-0.5}, \qquad \text{za } \xi_m < \xi_{mc}$$
(5-46)

• za prolom vala:

$$\frac{H_{2\%}}{\Delta D_{n50}} = 1.4P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} \cdot \xi_m^P, \qquad \text{za } \xi_m \ge \xi_{mc}$$
(5-47)

Propusnost

Stabilnost obloge je očito povezana s propusnosti konstrukcije, ovisno o veličini i graduiranosti filterskih slojeva i jezge konstrukcije. Veća propusnost uzrokuje većom stabilnošću jer više vode može prodrijeti u konstrukciju s većom propusnošću za vrijeme izdizanja valova te se zbog toga javljaju manje sile na elemente obloge. Važno je primijetiti da koeficijent propusnosti *P* predstavlja vrijednost propusnosti, a ne poroznosti.

5.3.4 Oštećenje obloge

Oštećenje je definirano kao pomicanje elemenata obloge, što znači da se pokušava procijeniti je li došlo do pomicanja elemenata, a nebitno koliko.

Za adekvatno predviđanje oštećenja konstrukcije tijekom njenog životnog vijeka potrebno je poznavati sljedeće parametre:

- broj oluja koje će djelovati na konstrukciju u njenom životnom vijeku
- broj i veličinu valova tijekom svake od tih oluja
- trajanje i distribuciju valnih visina u svakom stanju mora.

Prema dosadašnjim razmatranjima očigledno je da samo od strane Vidala poboljšana Van der Meerova formula (izrazi (5-44) i (5-45)) bar djelomično uzima u obzir navedene parametre.

Oštećenje sloja kamene obloge

Dvije glavne metode za određivanje stupnja oštećenosti su određivanje profila lukobrana i brojanje pomaknutih kamenih elemenata. Po prvoj metodi su stupanj oštećenja određivali Iribarren (1938.), Hudson (1959.), Ahrens (1975.), Thompson i Shuttler (1975.) i Broderick (1983.), dok je Hedar (1960.) koristio drugu metodu.

Broderick (1983.) predlaže korištenje bezdimenzionalnog parametra oštećenja, *S*, za kamene obloge, a određuje se izrazom:

$$S = \frac{A_e}{D_{n50}^2}$$
(5-48)

gdje je A_e srednja vrijednost erodirane površine poprečnog presjeka, a D_{n50} nazivni promjer kamene obloge.

U tablici 5-3 prikazane su projektne vrijednosti bezdimenzionalnog parametra oštećenja ovisno o nagibu pokosa i stupnju oštećenja.

Nagib	Početno	Srednje	Slom
pokosa	oštećenje	oštećeje	
1:1,5	2	3-5	8
1:2	2	4-6	8
1:3	2	6-9	12
1:4	3	8-12	17
1:5	3	8-12	17

Tablica 5-3 Projektne vrijednosti bezdimenzionalnog parametra oštećenja ovisno o nagibu pokosa i stupnju oštećenja

lako je Broderickov parametar S neovisan o duljini nasipa, ne razlikuje pomicanje elemenata kamene obloge od slijeganja profila. Nadalje, ne uzima u obzir poroznost sloja obloge.

Vidal i sur. (1995.) uzeli su u obzir dva parametra oštećenja: vizualni parametar oštećenja (S_v) koji se bazira na brojenju pomaknutih elemenata obloge i parametar oštećenja profila (S_p) određen kao osrednjena izračunata vrijednost erodiranih površina na profilu lukobrana. Zbog različite geometrije glave i tijela lukobrana, odredili su različite formule za određivanje oštećenja pojedinog dijela.

Parametar oštećenja profila S_p tijela lukobrana određuje se po izrazu (5-48).

Vizualno oštećenje tijela lukobrana određuje se kao:

$$S_{v} = \frac{N \cdot D_{n50}}{(1-n) \cdot X}$$
(5-49)

gdje je *N* broj pomaknutih elemenata obloge, *n* poroznost slojeva obloge, *X* duljina oštećenog područja lukobrana.

Vidal i sur. (1995.) došli su do zaključka da je područje na glavi lukobrana između razina (MMR+H_s/2) i (MMR-H_s) najviše izloženo oštećenjima, gdje je H_s značajna valna visina mjerena od nožice lukobrana. Vizualno oštećenje glave lukobrana određuje se prema izrazu:

$$S_{v},_{glava} = \frac{N \cdot D_{n50}}{(1-n) \cdot R \cdot \theta}$$
(5-50)

gdje je θ kut, *R* usrednjena vrijednost radijusa oštećenog područja, a određuje se prema izrazu:

$$R = \frac{B}{2} \pm \begin{cases} 0.5(H_s + R_c) \cot \alpha; R_c \le H_s/2\\ (0.25H_s + R_c) \cot \alpha; R_c \ge H_s/2 \end{cases}$$
(5-51)

gdje je α nagib pokosa lukobrana, *B* širina krune i R_c izložena površina konstrukcije.

Za različite stupnjeve oštećenja točnost i osjetljivost parametara S_v i S_p varira. Ukoliko je pomaknut mali broj elemenata obloge, parametar oštećenja S_v je točniji, ali s porastom stupnja oštećenja parametar S_p će biti točnije određen (Vidal i sur., 1995.).

Burcharth i sur (2006.) modificirali su izraz za vizualni parametar oštećenja i povezali ga s Broderickovim parametrom oštećenja.

Relativna vrijednost oštećenja N_{od} definirana je kao broj pomaknutih elemenata obloge vertikalno na potezu širine D_n koji se proteže od dna do vrha obloge (Van der Meer, 1988b.). Ova vrijednost može se povezati s postotkom oštećenja. N_{od} daje stvarnu vrijednost oštećenja, koja je povezana s brojem elemenata obloge poprečnog presjeka širine D_n tako da se za sličnu relativnu vrijednost oštećenja mogu dobiti različiti postoci oštećenja ako su poprečni presjeci različiti. Nedostatak vrijednosti N_{od} je u tome što ovisi o duljini nasipa lukobrana (CEM, 2006.).

Pomicanje elemenata obloge može se dogoditi na različite načine i može različito utjecati na oštećenje obloge. Neki elementi obloge mogu ispasti iz sloja obloge i tako u potpunosti izgubiti svoju funkciju, dok se drugi mogu pomaknuti unutar erodiranog dijela obloge, ali zadržati stabilan položaj i tako i dalje vršiti funkciju zaštite lukobrana. Metoda prebrojavanja podrazumijeva da se svi pomaci unutar slojeva obloge tretiraju kao oštećenje, dok se kod određivanja profila lukobrana promatra samo veličina erodiranog dijela. Tako se metodom prebrojavanja može precijeniti veličina oštećenja, a metodom određivanja profila lukobrana potcijeniti.

Oštećenje sloja betonske obloge

Kod određivanja oštećenja betonske obloge ne koristi se metoda određivanja profila nego metoda prebrojavanja pomaknutih elemenata (pomaknutih iz sloja ili manje/više od neke udaljenosti).

Elementi obloge mogu se pomaknuti zbog djelovanja valova, ali ostati na svom početnom položaju. Takvo micanje nema značajniji utjecaj kod kamene obloge, ali je veoma bitno kod betonskih obloga (npr. dolos i tetrapodi) jer takva vrsta micanja može uzrokovati lom te stoga Yagci i Kapdasli (2003.) smatraju i ove pomake jednom vrstom oštećenja. Ipak, ta vrsta oštećenja nije proučavana na modelima jer u malim (modelskim) mjerilima ne može doći do loma betonskih elemenata.

Kriteriji oštećenja

Losada i sur. (1986.) podijelili su uočeno oštećenje u tri stupnja: početak oštećenja, Iribarrenovo oštećenje i uništenje. Kasnije su Vidal i sur. (1991.) dodali i stupanj nazvan početak uništenja.

Početak oštećenja – određen broj elemenata obloge pomaknut na novu poziciju udaljenu više od D_n te takvo micanje ostavlja rupe veće od prosječnih veličina pora u slojevima obloge (procjenjena šteta od 2% metodom prebrojavanja ili od 5% metodom određivanja profila – SPM, 1984.).

Iribarrenovo oštećenje – broj pomaknutih elemenata obloge iz površinskog sloja je dovoljno velik da se može pomaknuti i element iz potpovršinskih slojeva. *Početak*

uništenja – smatra se kada zbog djelovanja valova dolazi do micanja elemenata obloge iz potpovršinskih slojeva.

Uništenje – ispiran je materijal iz potpovršinskog sloja i dolazi do konstantnog gubitka elemenata obloge; ako se djelovanje mora ne smanji, nakon određenog vremena lukobran će biti uništen.

Nije razumno projektirati oblogu kod koje uopće neće doći do oštećenja jer to zahtjeva izrazito velike i masivne elemente obloge. Van der Meer (1987.) odredio je da kriterij "bez oštećenja" znači da S iznosi između 1 i 3, a "popuštanje" kada je S>10. "Popuštanje" odgovara *početku uništenja* jer nakon tog stupnja oštećenja (hidruličke nestabilnosti) može doći od ubrzanog uništenja konstrukcije. Kod betonskih obloga početak uništenja smatra se kada je $N_{od}=0,5$ (Van der Meer, 1999.).

5.3.5 Usporedba formula stabilnosti

Očigledno je Van der Meerova formula složenija od Hudsonove i uključuje utjecaje valnog perioda, trajanje oluje, propusnost konstrukcije i jasno definiran stupanj oštećenja. No s druge strane zbog svoje složenosti zahtjevnija je u primjeni. Svi ovi parametri u Hudsonovoj formuli pokriveni su koeficijentom obloge.

Usporedbu prikazanih formula najlakše je provesti preko koeficijenta stabilnosti. Koeficijent stabilnosti ekvivalentan Hudsonovoj formuli oblika je $N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} = (k_D ctg\alpha)^{\frac{1}{3}}$, ranije prikazan izraz (5-37), a prema Van der Meerovoj za potopljene valove $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6.2P^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \xi_m^{-0.5}$ i za nepotopljene valove $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.0P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} \cdot \xi_m^P$ izrazi (5-40) i (5-41).

Većina lukobrana gradi se u prijelaznom i plitkom području gdje uslijed raznih procesa dolazi do deformacija valnih visina. Standardno formule stabilnosti ne uzimaju u obzir utjecaj loma valova i njihove deformacije, osim Van der Meerove formule koja taj problem rješava korištenjem $H_{2\%}$ umjesto H_s (izrazi (5-46) i (5-47)). Ovaj pristup poboljšava predviđanje oštećenja no ipak ne uzima u proračun sve utjecaje mjerodavne za oštećenje lukobrana. Gent i sur. (2003.) su nakon niza laboratorijskih ispitivanja preporučili poboljšanje Van der Meerove formule, no njihovi izrazi u primjeni su prilično ograničeni na uvjete za koje su i testirani u laboratoriju.

Iz prethodnih analiza Hudsonovog i Van der Meerovog izraza očigledno je da je utjecaj valne visine, gustoće kamena i relativne gustoće jednak. Osnovna razlika se javlja kod utjecaja nagiba pa je u nastavku i prikazana usporedba koeficijenata stabilnosti, u ovisnosti o nagibu, definiranih po ove dvije formule. Također, na različite načine u formule je uključen stupanj oštećenja. Prema vrijednostima postotka oštećenja danim u tablici 5-4 početno oštećenje u Van der Meerovoj formuli odgovara Hudsonovoj pretpostavki 0–5% oštećenja, nadalje ako se pretpostavi da je broj valova nakon kojih konstrukcija postigne ravnotežno stanje i koji više ne utječu na njenu stabilnost empirijski određen broj od 7500 valova u rasponu strmosti $0,005 < s_m < 0,06$ (što pokriva

praktički sve moguće slučajeve) na slikama 5-7, 5-8 i 5-9 prikazana je usporedba koeficijenta stabilnosti ovisno o nagibu pokosa prema Hudsonovoj i Van der Meerovoj formuli obzirom na stupanj oštećenja.

Elomont			Oštećenje D[%]						
Liement		0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	30-40	40-50	
Školjera (glatka)	$H/H_{D=0}$	1.00	1.08	1.14	1.20	1.29	1.41	1.54	
Školjera (hrapava)	$H/H_{D=0}$	1.00	1.08	1.19	1.27	1.37	1.47	1.56	
Tetrapodi, kvadripodi	$H/H_{D=0}$	1.00	1.09	1.17	1.24	1.32	1.41	1.50	

Tablica 5-4 Postoci oštećenja primarne obloge



Slika 5-7 Usporedba koeficijenta stabilnosti ovisno o nagibu pokosa prema Hudsonovoj i Van der Meerovoj formuli u slučaju bez oštećenja



Slika 5-8 Usporedba koeficijenta stabilnosti ovisno o nagibu pokosa prema Hudsonovoj i Van der Meerovoj formuli u slučaju srednjeg oštećenja



Slika 5-9 Usporedba koeficijenta stabilnosti ovisno o nagibu pokosa prema Hudsonovoj i Van der Meerovoj formuli u slučaju sloma

Iz prikazanih dijagrama može se vidjeti da praktički obje formule daju približno jednake rezultate, koji se temelje na empirijskim istraživanjima te kao takve automatski bolje pokrivaju tipove problema na kojima su i testirane.

Bitno je napomenuti da za vrlo strme nagibe niti jedna od formula ne daje pouzdane rezultate, dok je područje primjene kod blagih nagiba za Hudsonovu formulu ograničeno do $ctg\alpha < 4$, obzirom da utjecaji valova kod blagih pokusa u nju nisu uključeni.

Za praktičnu primjenu u početnoj fazi projektiranja preporuča se zbog jednostavnosti Hudsonova formula, u kasnijim fazama razvoja projekta primjena Van der Meerove formule, te konačno kod značajnijih građevina fizikalno modelska ispitivanja za konkretni slučaj.

5.3.6 Stabilnost konstrukcija s niskom krunom i potopljenih konstrukcija

Kod konvencionalnih lukobrana obično se dozvoljava prelijevanje u manjim količinama, ali kod konstrukcija s nižom krunom ta pojava je znatno češća te do oštećenja dolazi i s izložene i sa zaštićene strane pokosa. Međutim, prednost je u tome što valna enegija prelazi preko krune konstrukcije te elementi obloge s morske strane mogu biti manjih dimenzija (Van der Meer i Pilarczyk, 1990.).

Givler i Sørensen (1986.) proveli su oko 45 testova stabilnosti potopljenih konstrukcija na djelovanje pravilnih valova. Van der Meer (1988.) je proveo dvodimenzionalni test na konstrukciji s niskom krunom izloženoj potopljenim nepravilnim valovima. Van der Meer i Pilarczyk (1990.) su analizirali navedene radove i predložili sljedeći izraz za stabilnost konstrukcija s niskom krunom i potopljenih konstrukcija:

$$\frac{h_s}{h} = (2.1 + 0.1S) \exp(-0.14N_s^*)$$
(5-52)

gdje je $N_s^* = N_s s_p^{-1/3}$ Ahrenova (1984.) vrijednost spektralne stabilnosti, *h* dubina vode kod nožice konstrukcije i *h_c* visina konstrukcije.

6 Terensko istraživanje postojećih nasipnih lukobrana na Jadranu

Za potrebe verifikacije dobivenih rezultata provedena su terenska istraživanja postojećih nasipnih lukobrana na sjevernom i srednjem Jadranu (slika 6-1). Terenska ispitivanja provedena su na 13 lukobrana, 6 u Istri, 6 u Dalmaciji na području Splita i u Dubrovniku. Na svakom lukobranu snimljeno je nekoliko karakterističnih profila širine 3,5m od krune do linije morske razine na pokosu. Snimanja na dijelu pokosa ispod mora nisu provedena iz tehničkih razloga. Ispitivanje je provedeno na način da su mjereni svi dostupni blokovi unutar definiranog profila, dok je za ostale dimenzija procijenjena. Temeljem snimljenih podataka definirana je granulometrijska krivulja svakog profila i procijenjena ukliještenost.



Slika 6-1 Pregled snimljenih lokacija

Svi promatrani lukobrani smješteni su u području plitkovodne valne klime koja se određuje iz dubokovodne valne klime proračunima valnih deformacija, shoalling-a i refrakcije (trenje i refleksija su zanemareni). Refrakcija je interpretirana planom refrakcije na TK 1:25000, za sve izložene smjerove, za različite valne duljine metodom ortogonala temeljenoj na linearnoj teoriji. Na taj način definiran je za svaku pojedinu lokaciju najnepovoljniji koeficijent refrakcije po izloženim smjerovima, a koeficijent pličine (shoaling) očitan je iz dijagrama. Za neke pozicije, za koje su na raspolaganju bile bolje podloge i kvalitetnija batimetrija deformacije valnih visina kod prijelaza iz dubokog u plitko područje modelirana je numeričkim modelom MIKE 21/BW uzevši u obzir i refleksiju.

Za svaku lokaciju prema Hudsonovoj formuli, uz poznatu masu 50% zastupljenog bloka i procijenjenu uklještenost primarne obloge određena je značajna valna visina koja ne bi trebala utjecati na stabilnost lukobrana. Tako dobivena plitkovodna valna visina uzimajući u obzir valne deformacije transformirana je u ekvivalentnu dubokovodnu valnu visinu.

Za svaku lokaciju ovako dobivenim valnim visinama prema kartama valova Jadrana definiranim u prethodnim poglavljima pridružena su povratna razdoblja, a rezultati su prikazani u tablici 6-1.

Rezultati u tablici 6-1 koji se odnose na lukobrane sjevernog Jadrana vrlo su različiti.

Na slici 6-2 prikazan je detalj primarnog lukobrana u Umagu, iz kojeg je vidljivo da je primarna obloga u lošem stanju, da se mjestimično spustila od krune lukobrana i po nekoliko metara, te da su pojedini elementi obloge potpuno neuklješteni. Obzirom da se radi o izuzetno starom lukobranu, više puta saniranom i obzirom na novi položaj obloge promijenjenom geometrijom, teško je dati objektivno mišljenje. Procijenjeni nagib pokosa daje značajne valne visine preživljavanja 10 godišnjeg povratnog razdoblja.

Slična je situacija i s lukobranom u Novigradu (slika 6-3) na kojem su uočljiva oštećenja.

Lukobrani srednjeg Jadrana su svi relativno novi tako da je iz njihove analize samo moguće zaključiti da su svi projektirani na povratno razdoblje od 50 i više godina, te da se desteka godina njihovog postojanja nije došlo do nikakvih oštećenja (slika 6-4).

Jedini stariji lukobran je primarni lukobran u Splitu (slika 6-5) posljednji put saniran 80tih godina prošlog stoljeća trenutno u vrlo dobrom stanju. Prema tome u tablici 6-1 prikazana značajna valna visina minimalnog je povratnog razdoblja 30 godina, a analizama pridruženo povratno razdoblje odgovara 100 godišnjem.

Lukobran Kaše u Dubrovniku građevina je koja je kroz povijest štitila luku od morskih valova. Danas je to zaštićeni spomenik kulturne baštine, a poslijednji put je saniran 50tih godina prošlog stoljeća. Lukobran je i prije toga više puta saniran pa je teško definirati stanje pod morem. Rezultati analiza su pokazali da su značajne valne visine koje bi lukobran mogao podnjeti nakon deformacija u plitkom području iz izloženih smjerova povratnih razdoblja 20 i 100 godina prema u ovom radu definiranim kartama valova. Prema tome obzirom da 50 godina nije saniran može se pretpostaviti da valna klima koja se javlja ispred lukobrana odgovara povratnom razdoblju od cca 50 godina, što je u skladu s komentarom dugoročne valne klime koja na južnom Jadranu daje precijenjene vrijednosti

	ZA	PAD	JUGO	ZAPAD		
UMAG	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]		
marina	5,55	100	4,25	100		
UMAG	ZA	PAD	JUGO	ZAPAD		
primarni	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]		
lukobran	2,25	10	2,05	10		
	ZA	PAD	J	UG		
NOVIGRAD	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]		
	1,80	5	1,25	10		
	SJEVER	ROZAPAD				
ČERVAR	Hs [m]	PR [god]				
	2,05	100				
	SJEVER	ROZAPAD				
POREČ	Hs [m]	PR [god]				
	2,55	100				
	ZA	PAD	JUGO	ZAPAD		
ROVINJ	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]		
	3,60	100	3,60	100		
	JUG		JUGC	DISTOK		
marina	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]		
marma	2,75	100	2,55	100		
	JUGO	ZAPAD	J	UG	JUGO	ISTOK
luka	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]
Tana	3,15	100	3,00	100	3,30	100
SPI IT	JUGO	ZAPAD	J	UG	JUGO	ISTOK
Zenta	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]
Zenta	2,40	100	2,25	100	2,40	100
PODSTRANA	ZA	PAD	JUGO	ZAPAD	JL	JG
Hotel I av	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]
	3,20	100	2,50	100	3,00	100
	ZA	PAD	JUGO	ZAPAD	JL	JG
DUGI RAT	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]
	2,10	100	1,95	100	2,20	100
BAŠKA	ZA	PAD	JUGO	ZAPAD	JL	JG
VODA	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]
	2,30	100	2,45	100	4,10	100
	JUGO	ZAPAD	JUGC	DISTOK		
DUBROVNIK	Hs [m]	PR [god]	Hs [m]	PR [god]		
	6,45	100	7,25	20		

Tablica 6-1 Rezultati terenskih istraživanja



Slika 6-2 Pogled na pokos primarnog lukobrana u Umagu



Slika 6-3 Detalj oštećenja na pokosu lukobrana u Novigradu



Slika 6-4 Pogled i detalj novog lukobrana hotela Lav u Podstrani kod Splita



Slika 6-5 Primarni lukobran u Splitu

Detaljan prikaz obrade jedne pozicije dan je u Dodatku F za lokaciju Dubrovnik.

7 Optimizacija primarne obloge nasipnih zaštitnih građevina u uvjetima jadranske valne klime

U postupcima projektiranja nasipnih zaštitnih građevina, kao i kod svih drugih građevina, temeljni kriterij je sigurnost konstrukcije. Pri tome je moguće koristiti dva pristupa projektiranju:

- Tradicionalni pristup koji garantira sigurnost konstrukcije u njenom uporabnom vijeku
- Moderan pristup koji se temelji na vjerojatnosti oštećenja konstrukcije u uvjetima stohastičkih opterećenja iz okoliša.

U ovom radu jedan od ciljeva je pokazati da je optimalno projektiranje ekonomski prihvatljivije od tradicionalnog pristupa, te je u nastavku prikazan način izračuna troškova gradnje i održavanja nasipnih zaštitnih građevina, model optimizacije troškova i nekoliko numeričkih primjera u uvjetima jadranske valne klime.

U posljednjih desetak godina pristup projektiranju znatno je napredovao primjenom metoda optimizacije. Osnovna prednost ovih metoda je da daju optimalnu konstrukciju uz maksimalnu automatizaciju, tj. vrijednosti projektnih parametara određuju se postupkom optimizacije, a ne fiksno od strane projektanta. Na projektantu je da definira ciljnu funkciju koja se optimizira i da uvjetuje ograničenja zadana propisima.

Neki autori optimiziraju samo troškove izgradnje (Castillo i sur., 2003., 2004.), a neki ukupne troškove izgradnje, održavanja i popravaka (Voortman i sur., 1998.; Enevoldsen, 1991.; Enevoldsen i Sorensen, 1993., 1994.). U slučaju uzimanja u obzir pojave oštećenja u nekom nizu (Nielsen i Burcharth, 1983.) javlja se problem predviđanja takvih oštećenja, ali i definiranja samog oštećenja. Stoga se u ovom radu pretpostavlja da jedan ekstremni događaj može uzrokovati samo jedno oštećenje, dakle nije moguće akumulirati oštećenja, te da manje ili iste oluje ranije oštećeni lukobran ne oštećuju dodatno.

7.1 Optimizacija troškova gradnje i održavanja nasipnih zaštitnih građevina

Troškovi gradnje nasipnih zaštitnih građevina proračunavaju se za 1m' konstrukcije jednostavnim obračunom volumena pojedinih stavki koje se množe s odgovarajućom cijenom. Troškovi održavanja znatno se teže definiraju, obzirom da je potrebno uzeti u obzir vjerojatnost pojavljivanja oštećenja i težinu oštećenja u uporabnom vijeku konstrukcije. U proračunu troškova održavanja prvo je potrebno odrediti vjerojatnost pojavljivanja oluja definiranih nekom značajnom valnom visinom. Na temelju toga odredi se vjerojatnost oštećenja lukobrana tijekom uporabnog vijeka. Vjerojatnost oštećenja definira se za tri različita pristupa održavanju lukobrana:

- Oštećenje se popravlja odmah nakon oluje
- Oštećenje se popravlja jednom godišnje

• Oštećenje se ne popravlja.

U ovom radu koristi se postupak popravljanja oštećenja jednom godišnje.

Kod dimenzioniranja i analize pouzdanosti konstrukcije općenito u postupak su uključene neke slučajne varijable $(X_1, ..., X_n)$ koje sadrže geometrijske karakteristike, svojstva materijala, opterećenja i slično. Pretpostavlja se da su projektne vrijednosti srednje vrijednosti odgovarajućih slučajnih varijabli, budući ne moraju nužno i uvijek odgovarati stvarnim vrijednostima. Neke od ovih veličina se biraju prije samog postupka proračuna ili su propisane normama, dok se druge dobivaju postupkom optimizacije. U ovom radu skup varijabli $(X_1, ..., X_n)$ raspodijeljen je u 3 skupa:

- Optimizirana projektna vrijednost općenito *d*, za slučaj nasipnih zaštitnih građevina *W*, težina bloka primarne obloge.
- Projektne vrijednosti koje se ne optimiziraju općenito η, u konkretnom slučaju:
 ρ, svojstva materijala, c, troškovi i druge geometrijske karakteristike presjeka koje imaju svoju fiksnu vrijednost.
- Slučajni parametri modela općenito κ .

Pri tome su srednje vrijednosti promatranih veličina, koje se koriste u proračunu, označene s \overline{d} i $\overline{\eta}$.

Vjerojatnost oštećenja p_{st} tijekom slučajnog ekstremnog događaja općenito se može odrediti korištenjem funkcije gustoće vjerojatnosti svih uključenih varijabli $f_{x_1,...,x_n}(x_1,...,x_n;\overline{d},\overline{\eta},\kappa)$ izrazom

$$p_{st}(\overline{d},\overline{\eta},\kappa) = \int_{g} f_{X_1,\dots,X_n}(x_1,\dots,x_n;\overline{d},\overline{\eta},\kappa) dx_1\dots dx_n$$
(7-1)

pri čemu je $g = g(x_1, ..., x_n)$ jednadžba graničnog stanja prema kojem se provodi proračun.

Model optimizacije temelji se na nekoliko osnovnih pretpostavki:

- Referentni period analize vjerojatnosti oštećenja konstrukcije i izračuna troškova popravljanja i održavanja je jedna godina.
- Do oštećenja dolazi uslijed ekstremnih događaja, koji su stohastički procesi, tj. javljaju se slučajno tijekom godine uz definiranu srednju vrijednost godišnjeg pojavljivanja, r_{st}.
- Vjerojatnost oštećenja za slučajni događaj je $p_{st}(\overline{d},\overline{\eta},\kappa)$, pa je prema tome srednja vrijednost godišnjeg broja oštećenja dana izrazom

$$r(\overline{d},\overline{\eta},\kappa) = r_{st} \cdot p_{st}(\overline{d},\overline{\eta},\kappa)$$
(7-2)

- Jedan ekstremni događaj može uzrokovati samo jedno oštećenje, dakle nije moguće akumulirati oštećenja. Isto tako, manje ili iste oluje ranije oštećeni lukobran ne oštećuju dodatno.
- Broj ekstremnih događaja godišnje je ograničen.

Funkcija ukupnih očekivanih troškova dana preko dvije komponente koje opisuju trošak izgradnje ovisan o projektnim parametrima i trošak održavanja može se pisati u obliku

$$E[\text{cost}] = C_0(\overline{d},\overline{\eta}) + \sum_{n=1}^{LT} C_{r0}(\overline{d},\overline{\eta}) \cdot r(\overline{d},\overline{\eta},\kappa) \cdot \alpha^n, \qquad (7-3)$$

gdje su $E[\cos t]$ očekivani troškovi tijekom životnog vijeka konstrukcije, *LT*, $C_0(\overline{d},\overline{\eta})$ troškovi izgradnje konstrukcije, $C_{r0}(\overline{d},\overline{\eta})$ troškovi popravaka oštećenja (održavanja), oba vezana za vrijeme t = 0 i α koeficijent korekcije koji uključuje inflaciju i kamate definiran izrazom

$$\alpha = \frac{1+f}{1+r} \tag{7-4}$$

gdje je f stopa inflacije, a r kamatna stopa.

Vjerojatnost da se desi oštećenje kroz godinu jednaka je vjerojatnosti pojave oluje jednom ili više puta u godini, uz ranije spomenutu pretpostavku da manje ili iste oluje ranije oštećeni lukobran ne oštećuju dodatno, može se definirati jednostavnim izrazom

$$p_{st} = \sum_{i=1}^{r_{st}} p_H (1 - p_H)^{i-1}$$
(7-5)

gdje je p_H vjerojatnost pojave valne visine na koju je lukobran dimenzioniran.

7.2 Primjena prikazane metode optimizacije na primjeru dimenzioniranja primarne obloge nasipnih lukobrana u uvjetima jadranske valne klime

Analiza će se provesti za nasipne lukobrane kao najrašireniji tip zaštitnih građevina na Jadranu i to obzirom na ranije definirane modele definiranja jadranske valne klime za dva slučaja:

- lukobran na sjevernom Jadranu
- lukobran u zaštićenom području šireg splitskog akvatorija.

Opis postupka

Postupak optimizacije koji će se provesti u nastavku može se jednostavno prikazati kroz nekoliko karakterističnih koraka:

- definiranje tipa lukobrana, dubine vode i dugoročne valne klime (povratna razdoblja 5 do 100 godina)
- odabir vijeka trajanja konstrukcije
- projektiranje lukobrana standardnim postupcima za odabrane vrijednosti projektnih valnih visina definiranih povratnih razdoblja
- određivanje troškova izgradnje za svaki od odabranih slučajeva
- definiranje načina održavanja i određivanje troškova održavanja uz definiranje godišnjeg broja ekstremnih događaja i vjerojatnost njihovog pojavljivanja
- određivanje ukupnih troškova na godišnjoj bazi za svaki od odabranih slučajeva.
- određivanje optimalnog rješenja u ovisnosti o povratnom razdoblju projektne valne visine.

Godišnji broj ekstremnih događaja definirat će se na području Splita za razdoblje 40 godina u kojem se raspolaže podacima o vjetru, dok će se na sjevernom Jadranu gdje se raspolaže nizom od 10 godina podataka o vjetru biti definirana trim podacima. Vjerojatnost pojavljivanja ekstremnih događaja, odnosno valne visine na koju je građevina dimenzionirana određena je prema izrazu

$$p_H = \frac{T_{reg}}{N} \cdot \frac{1}{PR}$$
(7-6)

gdje je T_{reg} razdoblje registracije, N broj zabilježenih događaja i PR povratno razdoblje za koje se određuje vjerojatnost pojavljivanja ekstremnog događaja.

Postotak oštećenja definira se za ona stanja mora koja premašuju projektne parametre promatranog presjeka po Hudsonovom izrazu oblika

$$\frac{K_D}{K_{D=0}} = \left(\frac{H_s^{PR}}{H_{s,D=0}^{PR}}\right)^3$$
(7-7)

gdje je *D* postotak oštećenja primarne obloge, $K_{D=0}$ koeficijent obloge koji ne predviđa oštećenje (odnosno predviđa oštećenje 0-5%, definiran u tablici 5-3), K_D koeficijent obloge koji predviđa oštećenje obloge *D* (tablica 5-5), $H_{s,D=0}^{PR}$ značajna valna visina kojom je dimenzionirana obloga uz pretpostavku da nema oštećenja, H_s^{PR} značajna valna visina vala koji djeluje na lukobran i oštećuje ga. Izraz (7-7) izveden je izjednačavanjem težina obloge za slučaj oštećenja i bez oštećenja u Hudsonovoj formuli.

Koštanje oštećenja od jedne oluje definira se kao produkt postotka oštećenja i troškova izgradnje. Pri tome se pretpostavlja da lakša oštećenja, D < 20%, utječu samo na primarnu oblogu, ali zbog malog opsega radova prilikom popravka jedinične cijene se u ovom slučaju udvostručuju. Kod srednjih oštećenja, $20 \le D < 40\%$, potrebno je popravljati primarnu i sekundarnu oblogu, a jedinične cijene se povečavaju 50%. Kod velikih oštećenja, $D \ge 40\%$, predviđa se trošak popravka jednak trošku gradnje cijelog presjeka.

Godišnji trošak održavanja nakon oluje definirane s $H_s^{PR} > H_{s,D=0}^{PR}$ određen je množenjem troška popravka oštećenja nakon oluje i vjerojatnosti pojavljivanja takve oluje.

Optimizacija nasipnog lukobrana provodi se minimiziranjem ciljne funkcije definirane kao suma troškova izgradnje i održavanja na godišnjoj razini u ovisnosti o povratnom razdoblju projektne valne visine

7.2.1 Primjer 1 – lukobran na sjevernom Jadranu

Za primjer optimizacije nasipnog lukobrana na Sjevernom Jadranu odabrana je lokacija na području Istre izložena iz smjera zapada. Konstrukcija lukobrana predviđena je kao nasipni troslojni lukobran u dubokom s kotom dna ispred lukobrana na -10m.

Prema rezultatima dugoročne valne klime na području Sjevernog Jadrana definirana je valna klima promatrane lokacije prikazana u tablici 7-1.

POVRATNO RAZDOBLJE	ZNAČAJNA VALNA VISINA	VJEROJATNOST PREMAŠENJA VALNE VISINE	VJEROJATNOST OŠTEĆENJA
PR [god]	H _s [m]	р _н	p _{st}
2	1.31	0.00625	0.39442
5	1.71	0.00250	0.18147
10	2.02	0.00125	0.09522
20	2.35	0.00063	0.04879
30	2.55	0.00042	0.03279
40	2.70	0.00031	0.02469
50	2.81	0.00025	0.01980
100	3.18	0.00013	0.00995

Tablica 7-1 Podaci o valnoj klimi odabrane lokacije na Sjevernom Jadranu

Na temelju tako definirane valne klime definirani su troškovi izgradnje lukobrana na dubini -10m uz pretpostavljenu projektnu valnu visinu $H_{proj} = H_{1/10} = 1,27H_s$ različitih povratnih razdoblja. Trošak izgradnje lukobrana definiranog različitim povratnim razdobljima projektne valne visine prikazan je u tablici 7-2.

POVRATNO RAZDOBLJE	PRIMARNA OBLOGA	SEKUNDARNA OBLOGA	FILTER 1	OPĆI KAMENI NASIP	UKUPNO
PR [god]	[kn/m']	[kn/m']	[kn/m']	[kn/m']	[kn/m']
2	9770	2152	12536	44267	68726
5	15720	3498	14323	46875	80415
10	22616	5309	15061	48975	91962
20	29307	7206	15301	51301	103114
30	33959	9083	14973	52759	110774
40	37621	10028	16204	53273	117126
50	40512	10879	16514	53865	121769
100	51295	13876	17537	55921	138629

Tablica 7-2 Trošak izgradnje lukobrana projektiranog valnim visinama različitih povratnih razdoblja

Zatim je uz pretpostavku projektiranja lukobrana valnim visinama različitih povratnih razdoblja definiran godišnji trošak održavanja lukobrana prikazan u tablicama 7-3 do 7-9.

ZNAČAJNA VALNA VISINA	OMJER KOEFICIJENTA OBLOGE	POSTOTAK OŠTEĆENJA	TROŠAK POPRAVKA NAKON JEDNE OLUJE	GODIŠNJI TROŠAK ODRŽAVANJA
Hs [m]	$(H/H_{D=0})^{3}$	D [%]	[kn/m']	[kn/m']
1.31	0.45	0	0	0
1.71	1.00	5	1572	285
2.02	1.66	15	4716	449
2.35	2.62	30	8648	422
2.55	3.34	42	33774	1107
2.70	3.95	51	41012	1013
2.81	4.48	60	48249	956
3.18	6.50	80	64332	640
			ukupno [kn/m']:	4872

Tablica 7-3 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratnog razdoblja 5 godina

ZNAČAJNA VALNA VISINA	OMJER KOEFICIJENTA OBLOGE	POSTOTAK OŠTEĆENJA	TROŠAK POPRAVKA NAKON JEDNE OLUJE	GODIŠNJI TROŠAK ODRŽAVANJA
Hs [m]	$(H/H_{D=0})^3$	D [%]	[kn/m']	[kn/m']
1.31	0.27	0	0	0
1.71	0.60	0	0	0
2.02	1.00	5	2262	215
2.35	1.57	13	5880	287
2.55	2.01	19	8594	282
2.70	2.38	28	11728	290
2.81	2.70	32	13404	265
3.18	3.91	50	45981	458
			ukupno [kn/m']:	1797

Tablica 7-4 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratnog razdoblja 10 godina

	ZNAČAJNA VALNA VISINA	OMJER KOEFICIJENTA OBLOGE	POSTOTAK OŠTEĆENJA	TROŠAK POPRAVKA NAKON JEDNE OLUJE	GODIŠNJI TROŠAK ODRŽAVANJA
	Hs [m]	$(H/H_{D=0})^3$	D [%]	[kn/m']	[kn/m']
	1.31	0.17	0	0	0
ļ	1.71	0.38	0	0	0
ļ	2.02	0.64	0	0	0
ļ	2.35	, 1.00	5	2931	143
	2.55	1.28	10	5861	192
ļ	2.70	1.51	13	7620	188
ļ	2.81	1.71	17	9964	197
	3.18	2.49	30	16431	163
				ukupno [kn/m']:	884

Tablica 7-5 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratnog razdoblja 20 godina

ZNAČAJNA VALNA VISINA	OMJER KOEFICIJENTA OBLOGE	POSTOTAK OŠTEĆENJA	TROŠAK POPRAVKA NAKON JEDNE OLUJE	GODIŠNJI TROŠAK ODRŽAVANJA
Hs [m]	$(H/H_{D=0})^{3}$	D [%]	[kn/m']	[kn/m']
1.31	0.13	0	0	0
1.71	0.30	0	0	0
2.02	0.50	0	0	0
2.35	0.78	0	0	0
2.55	1.00	5	3396	111
2.70	1.18	8	5433	134
2.81	1.34	11	7471	148
3.18	1.94	19	12904	128
			ukupno [kn/m']:	522

Tablica 7-6 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratnog razdoblja 30 godina

	ZNAČAJNA VALNA VISINA	OMJER KOEFICIJENTA OBLOGE	POSTOTAK OŠTEĆENJA	TROŠAK POPRAVKA NAKON JEDNE	GODIŠNJI TROŠAK ODRŽAVANJA
	Hs [m]	(H/H _{D=0}) ³	D [%]	OLUJE [kn/m']	[kn/m']
	1.31	0.11	0	0	0
	1.71	0.25	0	0	0
	2.02	0.42	0	0	0
	2.35	, 0.66	0	0	0
	2.55	0.85	0	0	0
	2.70	1.00	5	3762	93
	2.81	1.13	7	5267	104
	3.18	1.65	15	11286	112
-				ukupno [kn/m']:	310

Tablica 7-7 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratnog razdoblja 40 godina

ZNAČAJNA VALNA VISINA	OMJER KOEFICIJENTA OBLOGE	POSTOTAK OŠTEĆENJA	TROŠAK POPRAVKA NAKON JEDNE OLUJE	GODIŠNJI TROŠAK ODRŽAVANJA
Hs [m]	$(H/H_{D=0})^{3}$	D [%]	[kn/m']	[kn/m']
1.31	0.10	0	0	0
1.71	0.22	0	0	0
2.02	0.37	0	0	0
2.35	0.58	0	0	0
2.55	0.75	0	0	0
2.70	0.88	0	0	0
2.81	1.00	5	4051	80
3.18	1.45	12	9723	97
			ukupno [kn/m']:	177

Tablica 7-8 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratnog razdoblja 50 godina

ZNAČAJNA VALNA VISINA	OMJER KOEFICIJENTA OBLOGE	POSTOTAK OŠTEĆENJA	TROŠAK POPRAVKA NAKON JEDNE OLUJE	GODIŠNJI TROŠAK ODRŽAVANJA
Hs [m]	$(H/H_{D=0})^3$	D [%]	[kn/m']	[kn/m']
1.31	0.07	0	0	0
1.71	0.15	0	0	0
2.02	0.26	0	0	0
2.35	0.40	0	0	0
2.55	0.51	0	0	0
2.70	0.61	0	0	0
2.81	0.69	0	0	0
3.18	1.00	5	5130	51
			ukupno [kn/m']:	51

Tablica 7-9 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratnog razdoblja 100 godina

Uz pretpostavku životnog vijeka konstrukcije 50 godina, i kamatnu i diskontnu stopu 7%, ukupni troškovi gradnje lukobrana (trajanja 1 godine) i održavanja lukobrana svedeni su na godišnju razinu, a rezultati su prikazani u tablici 7-10. Grafički prikaz dan je na slici 7-1 iz koje se jednostavno može očitati i optimalno rješenje postavljenog problema.

Potrebno je napomenuti da je ovakvu analizu nemoguće generalizirati zbog složenosti svakog pojedinog problema i niza utjecaja koji ovdje zbog općenitosti nisu uzeti u obzir, ali očigledno je da je optimalno rješenje u području povratnih razdoblja 10 do 20 godina.

POVRATNO RAZDOBLJE	ZNAČAJNA VALNA VISINA	TROŠKOVI GRADNJE I ODRŽAVANJA
PR [god]	Hs [m]	[kn/m'/god]
5	1,71	11459
10	2,02	9057
20	2,35	8942
30	2,55	9148
40	2,70	9413
50	2,81	9630
100	3,18	10802

Tablica 7-10 Troškovi gradnje i održavanja na godišnjoj razini u ovisnosti o povratnom razdoblju projektne valne visine



TROŠKOVI GRADNJE I ODRŽAVANJA

Slika 7-1 Optimizacija presjeka nasipnog lukobrana

7.2.2 Primjer 2 – lukobran u splitskom akvatoriju

Za primjer optimizacije nasipnog lukobrana u zaštićenom akvatoriju Srednjeg Jadrana odabrana je lokacija na području Makarske izložena iz smjera jugozapada i zapada. Konstrukcija lukobrana predviđena je kao nasipni troslojni lukobran u dubokom s kotom dna ispred lukobrana na -10m.

Prema rezultatima dugoročne valne klime na području lokalnog modela prikazanog u poglavlju 4 definirana je valna klima promatrane lokacije prikazana u tablici 7-11. Bitno je za primjetiti da u odnosu na valnu klimu definiranu na području sjevernog Jadrana, na ovoj lokaciji zabilježen je znatno veći raspon valnih visina za povratna razdoblja 5 do 100 godina. Na taj način analiza obuhvaća dvije bitno različite situacije kod procjene troškova gradnje i održavanja, odnosno definiranja optimalnog povratnog razdoblja projektne valne visine čime je proširena mogućnost praktične primjene dobivenih rezultata.

POVRATNO RAZDOBLJE	ZNAČAJNA VALNA VISINA	VJEROJATNOST PREMAŠENJA VALNE VISINE	VJEROJATNOST OŠTEĆENJA
PR [god]	Hs [m]	pН	pst
2	0.35	0.00423	0.39411
5	0.85	0.00169	0.18141
10	1.35	0.00085	0.09520
20	1.98	0.00042	0.04878
30	2.41	0.00028	0.03279
40	2.75	0.00021	0.02469
50	3.03	0.00017	0.01980
100	4.04	0.00008	0.00995

Tablica 7-11 Podaci o valnoj klimi odabrane lokacije na Sjevernom Jadranu

Na temelju tako definirane valne klime definirani su troškovi izgradnje lukobrana na dubini -10m uz pretpostavljenu projektnu valnu visinu $H_{proj} = H_{1/10} = 1,27H_s$ različitih povratnih razdoblja. Trošak izgradnje lukobrana definiranog različitim povratnim razdobljima projektne valne visine prikazan je u tablici 7-12.

POVRATNO RAZDOBLJE	PRIMARNA OBLOGA	SEKUNDARNA OBLOGA	FILTER 1	OPĆI KAMENI NASIP	UKUPNO
PR [god]	[kn/m']	[kn/m']	[kn/m']	[kn/m']	[kn/m']
2	1603	144	10490	37350	49587
5	4921	933	11518	40678	58050
10	9962	2222	11995	44988	69167
20	21841	5204	14250	48975	90270
30	30355	7390	15789	51664	105198
40	38710	10221	16801	53494	119226
50	46770	12669	16915	54982	131336
100	79029	22523	12735	62117	176404

Tablica 7-12 Trošak izgradnje lukobrana projektiranog valnim visinama različitih povratnih razdoblja

Zatim je uz pretpostavku projektiranja lukobrana valnim visinama različitih povratnih razdoblja definiran godišnji trošak održavanja lukobrana prikazan u tablicama 7-13 do 7-19.

ZNAČAJNA VALNA VISINA	OMJER KOEFICIJENTA OBLOGE	POSTOTAK OŠTEĆENJA	TROŠAK POPRAVKA NAKON JEDNE OLUJE	GODIŠNJI TROŠAK ODRŽAVANJA
Hs [m]	$(H/H_{D=0})^{3}$	D [%]	[kn/m']	[kn/m']
0.35	0.07	0	0	0
0.85	1.00	5	492	89
1.35	4.01	52	30186	2874
1.98	12.64	100	58050	2832
2.41	22.79	100	58050	1903
2.75	33.86	100	58050	1433
3.03	45.30	100	58050	1150
4.04	107.37	100	58050	578
			ukupno [kn/m']:	10859

Tablica 7-13 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratnog razdoblja 5 godina

ZNAČAJNA VALNA VISINA	OMJER KOEFICIJENTA OBLOGE	POSTOTAK OŠTEĆENJA	TROŠAK POPRAVKA NAKON JEDNE OLUJE	GODIŠNJI TROŠAK ODRŽAVANJA
Hs [m]	$(H/H_{D=0})^{3}$	D [%]	[kn/m']	[kn/m']
0.35	0.02	0	0	0
0.85	, 0.25	0	0	0
1.35	1.00	5	996	95
1.98	3.15	40	27667	1350
2.41	5.69	75	51875	1701
2.75	8.45	98	67784	1674
3.03	11.31	100	69167	1370
4.04	26.80	100	69167	688
			ukupno [kn/m']:	6877

Tablica 7-14 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratnog razdoblja 10 godina

ZNAČAJNA VALNA VISINA	OMJER KOEFICIJENTA OBLOGE	POSTOTAK OŠTEĆENJA	TROŠAK POPRAVKA NAKON JEDNE OLUJE	GODIŠNJI TROŠAK ODRŽAVANJA
Hs [m]	$(H/H_{D=0})^{3}$	D [%]	[kn/m']	[kn/m']
0.35	0.01	0	0	0
0.85	0.08	0	0	0
1.35	0.32	0	0	0
1.98	1.00	5	2184	107
2.41	1.80	17	7426	243
2.75	2.68	32	12982	321
3.03	3.58	48	43330	858
4.04	8.49	100	90270	898
			ukupno [kn/m']:	2427

Tablica 7-15 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratnog razdoblja 20 godina

ZNAČAJNA VALNA VISINA	OMJER KOEFICIJENTA OBLOGE	POSTOTAK OŠTEĆENJA	TROŠAK POPRAVKA NAKON JEDNE OLUJE	GODIŠNJI TROŠAK ODRŽAVANJA
Hs [m]	$(H/H_{D=0})^{3}$	D [%]	[kn/m']	[kn/m']
0.35	0.00	0	0	0
0.85	0.04	0	0	0
1.35	0.18	0	0	0
1.98	0.55	0	0	0
2.41	1.00	5	3036	100
2.75	1.49	13	7892	195
3.03	1.99	20	12142	240
4.04	4.71	60	63119	628
			ukupno [kn/m']:	1163

Tablica 7-16 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratnog razdoblja 30 godina

ZNAČAJNA VALNA VISINA	OMJER KOEFICIJENTA OBLOGE	POSTOTAK OŠTEĆENJA	TROŠAK POPRAVKA NAKON JEDNE OLUJE	GODIŠNJI TROŠAK ODRŽAVANJA
Hs [m]	$(H/H_{D=0})^3$	D [%]	[kn/m']	[kn/m']
0.35	0.00	0	0	0
0.85	, 0.03	0	0	0
1.35	0.12	0	0	0
1.98	0.37	0	0	0
2.41	0.67	0	0	0
2.75	, 1.00	5	3871	96
3.03	1.34	10	7742	153
4.04	3.17	40	29359	292
			ukupno [kn/m']:	541

Tablica 7-17 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratnog razdoblja 40 godina

ZNAČAJNA VALNA VISINA	OMJER KOEFICIJENTA OBLOGE	POSTOTAK OŠTEĆENJA	TROŠAK POPRAVKA NAKON JEDNE OLUJE	GODIŠNJI TROŠAK ODRŽAVANJA
Hs [m]	$(H/H_{D=0})^3$	D [%]	[kn/m']	[kn/m']
0.35	0.00	0	0	0
0.85	0.02	0	0	0
1.35	0.09	0	0	0
1.98	0.28	0	0	0
2.41	0.50	0	0	0
2.75	0.75	0	0	0
3.03	1.00	5	4677	93
4.04	2.37	28	24964	248
			ukupno [kn/m']:	341

Tablica 7-18 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratnog razdoblja 50 godina
ZNAČAJNA VALNA VISINA	OMJER KOEFICIJENTA OBLOGE	POSTOTAK OŠTEĆENJA	TROŠAK POPRAVKA NAKON JEDNE OLUJE	GODIŠNJI TROŠAK ODRŽAVANJA
Hs [m]	$(H/H_{D=0})^3$	D [%]	[kn/m']	[kn/m']
0.35	0.00	0	0	0
0.85	0.01	0	0	0
1.35	0.04	0	0	0
1.98	0.12	0	0	0
2.41	0.21	0	0	0
2.75	0.32	0	0	0
3.03	0.42	0	0	0
4.04	1.00	5	7903	79
			ukupno [kn/m']:	79

Tablica 7-19 Procjena oštećenja i troškova održavanja za lukobran projektiran valnom visinom povratnog razdoblja 100 godina

Uz pretpostavku životnog vijeka konstrukcije 50 godina, i kamatnu i diskontnu stopu 7%, ukupni troškovi gradnje lukobrana (trajanja 1 godine) i održavanja lukobrana svedeni su na godišnju razinu, a rezultati su prikazani u tablici 7-20. Grafički prikaz dan je na slici 7-2 iz koje se jednostavno može očitati i optimalno rješenje postavljenog problema.

POVRATNO RAZDOBLJE	ZNAČAJNA VALNA VISINA	TROŠKOVI GRADNJE I ODRŽAVANJA
PR [god]	Hs [m]	[kn/m'/god]
5	0.85	15498
10	1.35	11876
20	1.98	7965
30	2.41	8246
40	2.75	8736
50	3.03	10548
100	4.04	13761

Tablica 7-20 Troškovi gradnje i održavanja na godišnjoj razini u ovisnosti o povratnom razdoblju projektne valne visine



TROŠKOVI GRADNJE I ODRŽAVANJA

Slika 7-2 Optimizacija presjeka nasipnog lukobrana

7.3 Zaključak

Prema analizama prikazanim u prethodna dva primjera koja pokrivaju lukobrane i u nezaštićenom području sjevernog Jadrana i u relativno zaštićenom području splitskog akvatorija može se zaključiti da je optimalno rješene sa stajališta povratnog razdoblja u području između 15 i 25 godina. Isto tako sa slika 7-1 i 7-2 može se vidjeti da tradicionalni pristup, uz povratno razdoblje 50 do 100 godina daje s ekonomskog stajališta znatno skuplje rješenje.

Uz dodatne analize koje je za svaku lokaciju potrebno provesti vezano i za ostale, ranije spomenute, parametre optimizacije očekuje se da je uz moderan pristup projektiranju i provođenje optimizacije u standardnom postupku projektiranja moguće dimenzionirati ekonomski isplativije, a jednako stabilne i funkcionalne građevine.

8 Zaključak

8.1 Definiranje jadranske valne klime

Za optimizaciju nasipnih zaštitnih građevina mjerodavna je dugoročna valna klima vjetrovnih valova definirana na bazi kratkoročne valne klime.

Budući da nema registracija kratkoročne valne klime razvijene su metode njene prognoze iz podataka o vjetru koje se temelje na modelu valnog generativnog procesa treće generacije, poznatijeg kao WAM modela. U ovom radu korišten je numerički model MIKE 21/SW (DHI, 2009), razvijen na temelju WAM modela za primjenu na lokalnim modelima u zatvorenim bazenima i obalnim područjima, koji se temelji na Eulerovoj formulaciji ravnotežne jednadžbe spektralnog diskretnog valnog djelovanja. Model diskretizira spektar u frekventnoj domeni i po smjerovima, a kinematičko ponašanje valova (uključujući djelovanje struja) opisano je linearnom teorijom površinskih gravitacijskih valova. Model omogućava simulaciju generiranja, deformacija i zamiranja gravitacijskih vjetrovnih valova i valova mrtvog mora u području otvorenog mora i priobalja. Na temelju podataka o vjetru, preuzetih od DHMZ-a, definiranih prognostičkim modelom atmosfere ALADIN formirana je ovdje kratkoročna valna klima Jadrana za razdoblje 10 godina. Za potrebe verifikacije numeričkih modela valne dinamike korištene su dvije valografske postaje smještene u području otvorenog mora sjevernog Jadrana i ispred grada Splita. Mjerenja su provedena u periodu od 01.11.2007. do 15.11.2008. tijekom provedbe Programa praćenja stanja Jadranskog mora – Jadranski projekt (Andročec i sur., 2009.).

Dugoročna valna klima definira se dugoročnom valnom prognozom. Dugoročna valna prognoza je postupak određivanja statističkih reprezentativnih parametara valnog profila (u ovom radu značajnih valnih visina) uz pridruženi smjer rasprostiranja. Definira se na temelju velikog broja kratkoročnih prognoza, a za građevinsko-inžinjerske potrebe provodi se za razdoblja od 5 do 100 godina. Postupak određivanja dugoročne valne prognoze provodi se tako da se značajnoj valnoj visini pridruži vjerojatnost, ili povratno razdoblje u godinama.

Za provedbu dugoročnih prognoza optimalno razdoblje opažanja je 30 godina (da bi se prognozirala značajna valna visina 100 godišnjeg povratnog razdoblja). U ovom radu, kako je opisano u poglavlju 4, formirana su dva odvojena modela dugoročne prognoze:

- Jadranski model dugoročna prognoza za područje cijelog Jadrana (u kojem se raspolaže 10-godišnjim podacima o vjetru iz kojih su definirane kratkoročne prognoze tijekom 10 godina) definirana za povratna razdoblja 5, 10, 20, 25, 30, (40 i 50) godina
- Lokalni model dugoročna prognoza za lokalno međuotočko područje definirana je u dva slučaja:
 - Dugoročna prognoza na lokalnom modelu prema podacima iz prognostičkog modela ALADIN (podacima o vjetru iz kojih su definirane kratkoročne prognoze tijekom 10 godina) definirana za povratna razdoblja 5, 10, 20, 25, 30, (40 i 50) godina

 Dugoročna prognoza na lokalnom modelu prema podacima s okolnih mjernih postaja (raspolaže se podacima o vjetru s mjernih postaja u trajanju preko 40 godina) definirana za povratna razdoblja 5, 10, 20, 25, 30, 40, 50 i 100 godina, ali samo za N, NE, E, SE i S smjerove.

Rezultati Jadranskim modelom definirane dugoročne dubokovodne jadranske valne klime različitih povratnih razdoblja po smjerovima prikazani su u vidu karata valova u poglavlju 4 i Dodatku E. Ovdje je dan i tablični prikaz dobivenih rezultata za povratna razdoblja 30 godina interpretiranih karakterističnim točkama najvećih značajnih valnih visina pojedinih područja bliže hrvatskoj obali.

	SMJER	Ν	NE	E	SE	S	SW	W	NW
	SJEVERNI JADRAN	4,25	4,50	4,50	6,50	3,25	4,00	3,75	3,00
Hs[m]	SREDNJI JADRAN	5,00	4,50	3,00	8,50	3,75	3,50	4,50	3,50
	JUŽNI JADRAN	3,25	5,00	3,00	8,50	4,00	5,50	4,50	3,00

Tablica 8-1 Rezultati dugoročne jadranske valne klime po smjerovima i područjima za povratno razdoblje 30 godina

Prikazani rezultati dobiveni su stohastičkim proračunima te ih je potrebno promatrati kritički. U budućnosti svakako bi model bilo potrebno baždariti preko više od jedne mjerne točke na otvorenom moru s periodom opažanja minimalno 10 godina.

Potrebno je napomenuti da se ovdje radi o dubokovodnoj valnoj klimi koju je proračunima valnih deformacija za praktičnu primjenu u priobalnom području potrebno svesti na plitkovodnu valnu klimu (poglavlje 6 i Dodatak F). Iako numerički model korišten za kratkoročnu prognozu uključuje neke utjecaje priobalnog područja, ograničenja koja se nameću mogućnostima računala na kojima se model primijenjuje, povlače da je inžinjerski točnije napraviti model deformacija u priobalju nekim od specijaliziranih numeričkih modela. Proračun valnih deformacija potrebno je provesti za svaku promatranu lokaciju na temelju pripadne detaljne batimetrije, tipa obale i niza lokalnih utjecaja. Danas je pri tome uobičajena primjena nekog od numeričkih modela, a u ovom radu korišten je MIKE 21/BW (Dodatak F).

Lokalni model definiran je u cilju produljenja niza ulaznih podataka o vjetru podacima s lokalnih meteoroloških postaja. Analize su pokazale da je model primijenjiv samo za smejrove bure i juga. Lokalni model dugoročne valne prognoze na temelju podataka o vjetru iz prognostičkog modela atmosfere ALADIN daje različite rezultate u odnosu na lokalni model dugoročne prognoze na temelju podataka o vjetru s okolnih mjernih postaja. Slični rezultati dobiju se samo za smjerove bure i juga, dok se za ostale smjerove, koje karakterizira česta promjena smjera i brzine vjetra, rezultati bitno razlikuju. Od ova dva modela, lokalni model na temelju podataka o vjetru prognostičkog modela ALADIN je vjerodostojniji što je prikazano u ranijim analizama usporedbom s mjerenjima na valografu. To je i logično obzirom da je prognostičkim modelom ALADIN definirano polje vjetra prilično realno u odnosu na model sa "sintetičkim" poljem vjetra definiranim jednom ili par meteoroloških postaja. Iz provedenih analiza slijedi da je mogućnost primjene "sintetičkog" polja vjetra na bazi pojedinih mjernih postaja ograničeno veličinom akvatorija i raspoloživom gustoćom okolnih meteoroloških postaja, ali i lokalnim smještajem meteorološke postaje što se pokazalo dominantnim. Pokazalo se da je metoda primjenjiva samo za smjerove bure i juga za koje vjetar ima stalan smjer na većoj površini, tj. da na promatranom akvatoriju nema lokalnog vrtloženja. Pri tome se javlja ograničenje u smislu pokrivenosti Jadrana mjernim postajama s kontinuiranim mjerenjima. Naime, postaje s mjerenjima kraćim od 15 godina nisu interesantne obzirom na znatno kvalitetnije podatke o poljima vjetra koje daje prognostički model ALADIN, za sada u razdoblju 10 godina, ali u skorijoj budućnosti i za znatno dulje periode obzirom da se od 2004. kontinuirano koristi u DHMZ-u.

8.2 Optimizacija nasipnih zaštitnih građevina

Optimalno projektiranje konstrukcije poprečnog presjeka nasipnih zaštitnih građevina ovisno je o nizu parametra od kojih je velik broj specifičan za svaku pojedinu promatranu lokaciju. Neki od tih parametara su valna klima, batimetrija lokacije, valne deformacije u promatranom akvatoriju, vrsta i veličina raspoloživih obložnih blokova, tehnologija gradnje i način održavanja. Stoga je očigledno da je optimizaciju potrebno provoditi za svaku lokaciju posebno. U ovom radu, u poglavlju 7 pokazano je da se obzirom na odabir povratnog razdoblja za projektne valne visine između 15 i 30 godina postiže optimalna veličina izgradnje uz pretpostavku godišnjeg održavanja.

Provedene analize koncentrirane su na potrebe i mogućnosti gradnje na Jadranu, stoga su analize provođene za kamenu oblogu kao najrasprostranjeniju oblogu na Jadranu. Naime, obzirom na raspoloživost kamenog materijala, jadransku valnu klimu i konfiguraciju obale može se zaključiti da u pravilu nema potrebe za korištenjem betonskih elemenata primarne obloge lukobrana.

8.3 Preporuke za projektiranje nasipnih zaštitnih građevina na Jadranu

Obzirom na široku analizu valnih polja po smjerovima i povratnim razdobljima definirani rezultati do povratnih razdoblja 30 godina (obzirom na ulazne podatke na temelju kojih je model formiran) mogu se smatrati okvirnim preporukama za definiranje značajnih valnih visina u dubokom kod projektiranja zaštitnih građevina.

Također, prema prikazanim analizama optimizacije nasipnih građevina očigledno je da tradicionalno projektiranje s projektnim valnim visinama povratnih razdoblja 50 do 100 godina ne daje po tehničkom i ekonomskom kriteriju optimalno rješenje. Preporuka proizašla iz ovog rada je da se za svaku pojedinu lokaciju kod projektiranja provede optimizacija uzimanjem u obzir svih ranije navedenih parametara, a obzirom na povratno razdoblje projektne valne visine kao najjednostavniji pristup. Ne postoje zakonske preporuke primjene optimalnog projketiranja.

8.4 Legislativni aspekt jadranske valne klime

Nakon provedbe potpunog definiranja jadranske valne klime, prema 8.5, moguće je načiniti Nacionalni propis za određivanje djelovanja valova na konstrukciju, po ugledu na EN za vjetar, EN-1991-2-4:2004 s NAD-om za Hrvatsku. Za sada ne postoje takve intencije. No koncept sa značajnom valnom visinom 50 do 100-godišnjeg povratnog razdoblja kao karakterističnom vrijednosti valne visine (načelno prikazan u EAU) mogao bi se na sličan način uvesti u sustav normi. Koncept je lako moguće formalizirati uz definiranje značajne valne visine kao karakteristične valne visine, $H_c = H_s^{50-100 god}$, i projektne valne visine ovisno o tipu konstrukcije u obliku $H_d = 1,27 \cdot H_s^{50-100 god}$ za nasipne građevine i $H_d = 2 \cdot H_s^{50-100 god}$ za vertikalne građevine u uvjetima apsolutnog projektiranja. Pri tome bi djelovanje valova pripadalo u promijenjiva djelovanja iz okoliša građevine.

8.5 Preporuke za nastavak istraživanja

Prikazani rad je definirao korektan model generiranja vjetrovnih valova na području Jadrana i razvio metodologiju formiranja jadranske dubokovodne valne klime po smjerovima i po povratnim razdobljima na temelju podataka o vjetru. U daljnjim istraživanjima bazu podataka kratkoročnih valnih klima trebalo bi kontinuirano puniti novim podacima analiza budućih atmosferskih situacija, ili ako se želi proces ubrzati analizama povijesnih atmosferskih situacija kako bi se dobio neprekidni niz trajanja 30 godina. Na temelju tih podataka bi se definirale pouzdane dugoročne prognoze za primjenu u legislativi.

Osim produženog razdoblja opažanja vjetra za pouzdanost predložene metodologije esencijalno je bitno postaviti valografe uzduž otvorenog Jadrana (minimalno 3 točke – sjeverni srednji i južni Jadran) i u druge zaštićene akvatorije u periodu 10 godina te na temelju toga baždariti Jadranski numerički model i druge lokalne numeričke modele generiranja vjetrovnih valova. Na temelju tih podataka bi se definirale pouzdane dugoročne 100-godišnje prognoze za primjenu u legislativi.

Zanimljiva bi bila i usporedba dugoročne valne klime definirane na temelju dosadašnjih podataka o vjetru 10-godišnjeg razdoblja i na temelju podataka o vjetru dužeg razdoblja.

Konačno usporedbom dugoročne valne klime dobivene Jadranskim modelom i nizom lokalnih modela u zaštićenim područjima mogla bi se definirati korektna karta valova Jadrana po smjerovima i povratnim razdobljima koja bi bila prihvatljiva u praktičnom projektiranju.

U području projektiranja optimizacija bi se mogla proširiti na razne tipove zaštitnih građevina kao što su lukobrani različitih tipova konstrukcije – nasipni lukobrani s kamenom oblogom (detaljno analizirani u ovom radu), nasipni lukobrani s bermom, nasipni lukobrani s betonskom oblogom, valolome, vertikalne i perforirane lukobrane itd.

U ekonomskom pogledu optimizaciju je moguće proširiti i na tehnologiju gradnje i na funkcioniranje zaštitnih građevina kao djela složenijh sustava pomorskih građevina.

Popis korištenih oznaka

A _e	srednja vrijednost erodirane površine poprečnog presjeka
a_b	orbitalni pomak vodne čestiče na dnu
C _{dis} C _f	koeficijent trenia ovisan o temelinom tlu i uvietima tečenia
$C_0(\overline{d},\overline{\eta})$	troškovi izgradnje konstrukcije
$C_{r0}(\overline{d},\overline{\eta})$	troškovi popravaka oštećenja (održavanja)
с	fazna brzina vala
$C_{g,x}$	brzina valne grupe u x smjeru
$C_{g,y}$	brzina valne grupe u y smjeru
$C_{g,\lambda}$	brzine grupe u smjeru longitude
$C_{g,\varphi}$	brzine grupe u smjeru latitude
$c_{ heta}$	brzina rotacije
D _n	nazivni promjer kamene obloge
D _{n50}	srednja vrijednost od <i>D</i> _n
	energija valnog spektra, $E(f, \theta; x, y, t)$
E[cost]	očekivani troškovi tijekom životnog vijeka konstrukcije
F	duljina privjetrišta
J £	folder trania
J_w	
g Haaa	gravitacijsko ubrzanje maksimalna valna visina
$H_{\rm s}$	značajna valna visina
H_{50}	prosječna valna visina 50 najviših valova koji djeluju na konstrukciju u
	projektnom periodu
H _{2%}	valna visina koju premasuje 2% najvisin valova
h _c	visina konstrukcije
ĸ	valni broj
\vec{k}_i	vektor valnog broja
\overline{k}	srednji valni broj
k_N	konstantna geometrijska hrapavost po Webber-u
L	valna dužina [m]
LT	životni vijek konstrukcije
N	valno djelovanje, $N(x,y,\omega,\theta)$
N	broj pomaknum elemenata obloge
Ns	koeficijent stabilnosti
Ns*	Ahrenova vrijednost spektralne stabilnosti
n	poroznost slojeva obloge
Р DD	parametar poroznosti lukobrana
г к	povratno razuobije vjerojatnost pojave valne vjejne na koju je lukohran dimonzioniran
P_H	יופרטומנווטסו אטומיב ימוווב יוסוווב וומ גטוע וב ועגטטומוו עוווובווצוטווומוו

p_{st}	vjerojatnost oštećenja tijekom slučajnog ekstremnog događaja
Q_b	parametar lomljenih valova
R _c	izloženost konstrukcije
r _{st}	srednja vrijednost godišnjeg pojavljivanja ekstremnog događaja
S	ukupna snaga koja ulazi i izlazi u i iz sustava u zakonu očuvanja energije sustava
S_{bot}	disipacija enrgije uslijed trenja s dnom
S_{ds}	disipacija energije uslijed površinskog loma valova,
S_{in}	snaga koja u sustav dolazi od vjetra,
S_{nl}	nelinearni prijenos energije između samih valova
S _{surf}	disipacija valne energije uslijed loma valova uzrokovanog promjenom
surj	dubine
S	parametar oštećenja
Sv	vizualni parametar oštećenja
Sp	parametar oštećenja profila
S _{om}	strmost vala
	Valni period [s]
1 m t	
U	brzinu vietra 10m iznad površine vode
10	brzinsko trenja od vjetra
	modelska konstanta
	hrapavost morske površine inducirana dielovanjem vjetra.
201 Z 01	utiecaji gravitacijskih-kapilarnih valova na hrapavost morske površine z_0
~06	utiecaji kratkih gravitacijskih valova na hrapavost morske površine z_0
\sim_{0w}	kut nagiba pokosa konstrukcije
a	strmost valnog polia
а арм	strmost valnog polja, strmost valnog polja u Pierson-Moskowitz valnom spektru
α _{PM}	Batties-Janssen kalibraciiska konstanta lomlienih valova.
(λ, φ)	longituda i latituda
θ	smjer vala
$\mu = c_{g,x} \Delta t / \Delta x$	Courant-Friedrichs-Lewyev broj (CFL)
$ ho_{\sf Z}, ho_{\sf V}$	gustoće zraka i vode
κ	Karmanova konstanta
$ heta_{w}$	smjer vjetra
μ	bezdimenzionalna kritična visina vala definirana izrazom
τ	ukupno naprezanje
τ_w	naprezanje na morskoj povrsini inducirano djelovanjem vjetra kutna frekvencija
<u> </u>	srednja kutna frekvencija
Λ	relativna gutoća elementa obloge
	kut nagiba temelia obloge
0.	gustoća elementa obloge
ξ m	Irribarenov parametar ili parametar loma

Literatura

- Abdalla, S., Özhan, E., 1993. Third-generation wind-wave model for use on personal computers. *Journal of Waterway Port, Coastal and Ocean Engineering* 119, 975–986.
- Abdalla, S., Cavaleri, L., 2002. Effect of wind variability and variable air density on wave modeling. *Journal of Geophysical Research* 107 (C7), 17–1–17-17.
- Agnon, Y., Sheremet, A., 1997. Stochastic nonlinear shoaling of directional spectra. *Journal of Fluid Mechanics* 345, 79–99.
- Agnon, Y., Sheremet, A., 2000. Stochastic evolution models for nonlinear gravity waves over uneven topography. In: Liu, Philip L.-F. (Ed.). *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, vol. 6. World Scientific, Singapore, pp. 103–133.

Airy, G.B., 1845. Tides and waves. In: Encyclopedia Metropolitana. London, p. 289.

Alves, J.-H.G.M., Banner, M.L., 2003. Performance of a saturation-based dissipation-rate source term in modeling the fetch-limited evolution of wind waves. *Journal of Physical Oceanography* 33, 1274–1298.

Andročec, V., Beg-Paklar, G., Dadić, V., Djakovac, T., Grbec, B., Janeković, I., Krstulović, N., Kušpilić, G., Leder, N., Lončar, G., Marasović, I., Precali, R., Šolić, M.: *The Adriatic Sea Monitoring Program - Final Report*, Zagreb, 2009.

Ardhuin, F., Herbers, T.H.C., O'Reilly, W.C., 2001. A hybrid Eulerian–Lagrangian model for spectral wave evolution with application to bottom friction on the continental shelf. *Journal of Physical Oceanography* 31 (6), 1498–1516.

Ardhuin, F., Herbers, T.H.C., 2005. Numerical and physical diffusion: Can wave prediction models resolve directional spread? *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 22 (7), 883–892.

Ardhuin, F., Jenkins, A.D., 2005. On the effect of wind and turbulence on ocean swell. In: Chung, Jin S., Jenkins, Alastair D., Kashiwagi, Masashi (Eds.). *Proceedings of the 15th (2005) International Offshore and Polar Engineering Conference*, vol. III. International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), Seoul, Korea, pp. 429–434.

Ardhuin, F., Jenkins, A.D., 2006. On the effect of wind and turbulence on ocean swell. *Journal of Physical Oceanography* 36, 551–557.

Ardhuin, F., Magne, R., 2007. Current effects on scattering of surface gravity waves by bottom topography. *Journal of Fluid Mechanics* 576, 235–264.

Ardhuin, F., Herbers, T.H.C., O'Reilly, W.C., 2001. A hybrid Eulerian–Lagrangian model for spectral wave evolution with application to bottom friction on the continental shelf. *Journal of Physical Oceanography* 31 (6), 1498–1516.

Ardhuin, F., O'Reilly, W.C., Herbers, T.H.C., Jessen, P.F., 2003a. Swell transformation across the continental shelf. Part I: Attenuation and directional broadening. *Journal of Physical Oceanography* 33 (9), 1921–1939.

Ardhuin, F., Herbers, T.H.C., Jessen, P.F., O'Reilly, W.C., 2003b. Swell transformation across the continental shelf. Part II: validation of a spectral energy balance equation. *Journal of Physical Oceanography* 33 (9), 1940–1953.

- Ardhuin, F., Herbers, T.H.C., Watts, K.P., van Vledder, G.P., Jensen, R., Graber, H., 2007. Swell and slanting fetch effects on wind wave growth. *Journal of Physical Oceanography* 37 (4), 908–931.
- Babanin, A.V., Soloviev, Yu.P., 1998a. Field Investigation of transformation of the wind wave frequency spectrum with fetch and the stage of development. *Journal of Physical Oceanography* 28, 563–576.

Babanin, A.V., Young, I.R., 2005. Two-phase behaviour of the spectral dissipation of wind waves. In: Proceedings of the Fifth International Symposium WAVES 2005, 3–7 July, 2005, Madrid, Spain.

Babanin, A.V., Young, I.R., Banner, M.L., 2001. Breaking probabilities for dominant surface waves on water of finite constant depth. *Journal of Geophysical Research* C106, 11659–11676.

- Bajić, A., 1989. Severe bora on the northern Adriatic. Part I: Statistical analysis. *Rasprave–Papers*, 24, 1–9
- Bajić, A., Ivatek-Šahdan, S., Horvath, K., 2010. Prostorna razdioba brzine vjetra na području Hrvatske dobivena numeričkim modelom atmosphere ALADIN, *Hrvatski meteorološki časopis*, u postupku objavljivanja

Banner, M.L., Babanin, A.V., Young, I.R., 2000. Breaking probability for dominant waves on the sea surface. *Journal of Physical Oceanography* 30, 3145–3160.

- Battjes, J.A., Janssen, J.P.F.M., 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering. American Society of Civil Engineers, New York, pp. 569–587.
- Battjes, J.A., Groenendijk, H.W., 2000. Wave height distribution on shallow foreshores. *Coastal Engineering* 40, 161–182.
- Belcher, S.E., Hunt, J.C.R., 1993. Turbulent shear flow over slowly moving waves. *Journal of Fluid Mechanics* 251, 109–148.
- Benoit, M., 2005. Evaluation of methods to compute the non-linear quadruplets interactions for deepwater wave spectra. In: Proceedings of the Fifth International Symposium on Ocean Waves Measurement and Analysis, Madrid (Spain), 3–7 July 2005, Waves 2005, pp. 1– 10, ASCE, paper no. 52.
- Benoit, M., Marcos, F., Becq-Girard, F., 1997. Development of a third generation shallow-water wave model with unstructured spatial meshing. In: Edge, Billy L. (Ed.). *Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering*, 1996, vol. 1. American Society of Engineers Publications, pp. 465–478.
- Bolanos–Sanchez, R., Cateura, J., Sanchez–Arcilla, A., 2007. Evaluation of two atmospheric models for wind-wave modelling in the NW Mediterranean, *Journal of Marine Systems*, 65, 336–353.
- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third generation wave model for coastal regions, Part I: model description and validation. *Journal of Geophysical Research* 104 (C4), 7649–7666.
- Boussinesq, J., 1872. Theórie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées* 17 (2), 55–108.
- Brzović, N., Jurčec, V., 1997. Numerical simulation of the Adriatic cyclone development, *Geofizika*, 14, 29–46
- Brzović, N. Strelec-Mahović, N., 1999. Cyclonic activity and severe jugo in the Adriatic, *Physics and*. *Chemistry of the. Earth, B: Hydrology of Oceans and Atmosphere*, 24, 653–657.
- Burchart, H.F., Kramer, M., Lamberti, A., Zanuttigh, B., 2006. Structural stability of detached low crested breakwaters. *Coastal Engineering* 53 (4), 381–394.
- Castillo, C., Mínguez, R., Castillo, E., Losada, M., 2006. An optimal engineering design method with failure rate constraints and sensitivity analysis: Application to composite breakwaters. *Coastal Engineering* 53, 1–25.
- Castillo, E., Conejo, A.J., Mínguez, R., Castillo, C., 2003. An alternative approach for addressing the failure probability-safety factor method with sensitivity analysis. *Reliability Engineering and System Safty* 82 (2), 207–216.
- Castillo, E., Losada, M., Mínguez, R., Castillo, C., Baquerizo, A., 2004. An optimal engineering design method that combines safety factors and failure probabilities: Application to rubble-mound breakwaters. *Journal of. waterway, port, coastal and Ocean Engineering* ASCE 130 (2), 77–88.
- Cavaleri, L., 2006. Wave modeling where to go in the future. *Bulletin of the American Meteorological Society* 87, 207–214.
- Cavaleri, L., Bertotti, L., 2003b. The characteristics of wind and wave fields modelled with different resolutions. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 129, 1647–1662.
- Cavaleri, L., Malanotte-Rizzoli, P., 1981. Wind wave prediction in shallow water: theory and applications. *Journal of Geophysical Research* 86, 10961–10975.
- Chalikov, D.V., Makin, V.K., 1991. Models of the wave boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology* 56, 83–99.
- Chalikov, D.V., Belevich, M.Y., 1993. One-dimensional theory of the wave boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology* 63, 65–96.
- Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., Kennedy, A.B., Chawla, A., 2000. Boussinesq modelling of wave transformation, breaking, and runup. II: 2D. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 126, 48–56.
- Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., Shi, F., Thornton, E.B., 2003. Boussinesq modelling of longshore currents. *Journal of Geophysical Research* 108 (C11), 3362.
- Chen, Y., Guza, R.T., Elgar, S., 1997. Modelling spectra of breaking surface waves in shallow water. *Journal of Geophysical Research* 102, 25035–25046.
- Christoffersen, J.B., Jonsson, I.G., 1985. Bed friction and dissipation in a combined current and wave motion. *Ocean Engineering*12, 387–423.
- Coastal Engineering Manual (CEM), 2006. Engineer Manual 11110-2-1100. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Goverment Printing Office, Washington, D.C., (in 6 volumes)

Collins, J.I., 1972. Prediction of shallow water spectra. *Journal of Geophysical Research – Oceans* 93 (C1), 491–508.

Cordoneanu, E., Geleyn, J.F., 1998. Application to local circulation above the Carpathian Black Sea area of a NWP-type meso-scale model, *Contributions to Atmospheric Physics*, 71, 191–212.

Courtier, P.C., Freydier, J.F., Geleyn, F., Rochas, M., 1991. The ARPEGE project at METEO-FRENCE, *Proceedings from the ECMWF workshop on numerical methods in atmospheric models*, 193–231.

Cushman-Roisin B., Gačić, M., Poulain, P.M., Artegiani, A., 2001. Physical Oceanography of the Adriatic Sea – Past, Present and Future, Kluwer Academic Publishers

- Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1984. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. World Scientific, Singapore, p. 353.
- Dobson, F.W., 1971. Measurements of atmospheric pressure on wind-generated sea waves. *Journal* of Fluid Mechanics 48, 91.

Donelan, M.A., 1982. The dependence of the aerodynamic drag coefficient on wave parameters. Proceedings of the First International Conference on Meteorological and Air/sea Interaction of the Coastal Zone. *American Meteorology Society*, Boston, MA, pp. 381–387.

- Donelan, M.A., 2001. A nonlinear dissipation function due to wave breaking. In: ECMWF Workshop on Ocean Wave Forecasting, 2–4 July, 2001, Series ECMWF Proceedings, pp. 87–94.
- Donelan, M.A., Pierson, W.J., 1987. Radar scattering and equilibrium ranges in wind-generated waves with application to scatterometry. *Journal of Geophysical Research* C95, 4971–5029.
- Donelan, M.A., Yuan, Y., 1994. Wave dissipation by surface processes. In: Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M.A., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P.A.E.M. (Eds.), *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press, pp. 143–155.
- Drennan, W.M., Graber, H.C., Donelan, M.A., 1999a. Evidence for the effects of swell and unsteady winds on marine wind stress. *Journal of Physical Oceanography* 29, 1853–1864.
- Drennan, W.M., Kahma, K.K., Donelan, M.A., 1999b. On momentum flux and velocity spectra over waves. *Boundary-Layer Meteorology* 92, 489–515.
- Dyachenko, A.I., Korotkevich, A.O., Zakharov, V.E., 2004. Weak turbulent Kolmogorov spectrum for surface gravity waves. *Physical Review Letters* 92 (13). Art. No. 134501.
- Dykes, J.D., Wang, D.W., Book, J.W., 2009. An evaluation of a high-resolution operational wave forecasting system in the Adriatic Sea, *Journal of Marine Systems*, 78, 255–271.
- Eldeberky, Y., Battjes, J.A., 1996. Spectral modeling of wave breaking: application to Boussinesq equations. *Journal of Geophysical Research* 101, 1253–1264.
- Eldeberky, Y., Madsen, P.A., 1999. Deterministic and stochastic evolution equations for fully dispersive and weakly nonlinear waves. *Coastal Engineering* 38, 1–24.
- Enevoldsen, I., 1991. Reliability-based structural optimization, Ph. D. thesis, University of Aalborg, Aalborg, Denmark
- Enevoldsen, I., Sorensen, J.D., 1993. Reliability-based optimization of series systems of parallel systems. *Journal of Structural Engineering* 119 (4), 1069–1084.
- Enevoldsen, I., Sorensen, J.D., 1994. Reliability-based optimization in structural engineering. *Structural Safety* 15, 169–196.
- Fuhrman, D.R., Madsen, P.A., Bingham, H.B., 2004. A numerical study of crescent waves. *Journal of Fluid Mechanics* 513, 309–342.
- Fuhrman, D.R., Bingham, H.B., 2004. Numerical solutions of fully nonlinear and highly dispersive Boussinesq equations in two horizontal dimensions. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 44, 231–255.
- Fuhrman, D.R., Madsen, P.A., Bingham, H.B., 2004. A numerical study of crescent waves. *Journal of Fluid Mechanics* 513, 309–342.
- Gemmrich, J., 2005. On the occurrence of wave breaking. In: Muller, P., Henderson, D. (Eds.), The 14th 'Aha Huliko'a Winter Workshop ROGUE WAVES, January 24–28, 2005. U. Hawaii, School of Ocean and Earth Science and Technology, pp. 123–130.
- Gent, P.R., Taylor, P.A., 1976. A numerical model of the air flow above water waves. *Journal of Fluid Mechanics* 77, 105–128.
- Grant, W.D., Madsen, O.S., 1979. Combined wave and current interaction with a rough bottom. *Journal of Geophysical Research* 84, 1797–1808.
- Groen, P., Dorrestein, R., 1950. Ocean swell: its decay and period increase. Nature 165, 445-447.
- Hanson, J.L., Phillips, O.M., 1999. Wind sea growth and dissipation in the open ocean. *Journal of Physical Oceanography* 29, 1633–1648.

- Hashimoto, N., Tsuruya, H., Nakagawa, Y., 1998. Numerical computations of the nonlinear energy transfer of gravity-wave spectra in finite water depth. *Coastal Engineering Journal* 40 (1), 23–40.
- Hashimoto, N., Kawaguchi, K., 2001. Extension and modification of the Discrete Interaction Approximation (DIA) for computing nonlinear energy transfer of gravity wave spectra. In: Edge, Billy L., Hamsley, J. Michael (Eds.). Ocean Wave Measurement and Analysis, Proceedings of the WAVES 2001: The 4th International Symposium, vol. 1. ASCE, San-Francisco, CA, USA, pp. 530–539.
- Hasselmann, K., 1962. On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part 1. General theory. *Journal of Fluid Mechanics* 12, 481–500.
- Hasselmann, K., 1963a. On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part 2. Conservation theorems; wave-particle analogy; irreversibility. *Journal of Fluid Mechanics* 15, 273–281.
- Hasselmann, K., 1963b. On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part 3. Evaluation of energy flux and swell-sea interaction for a Neumann spectrum. *Journal of Fluid Mechanics* 15, 385–398.
- Hasselmann, K., 1974. On the spectral dissipation of ocean waves due to white capping. *Boundary-Layer Meteorology* 6, 107–127.
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.I., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deutsche Hydrographische Zeitschrift A* 8 (12), 1– 95.
- Hasselmann, D.E., Bosenberg, J., 1991. Field measurements of wave-induced pressure over wind sea and swell. *Journal of Fluid Mechanics* 230, 391–428.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J.A., Barnett, T.P., 1985. Computations and parameterizations of the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part 2: parameterizations of the non-linear transfer for application in wave models. *Journal of Physical Oceanography* 15, 1378–1391.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., 1981. Asymmetrical method of computing the non-linear transferina gravity wave spectrum (partsl, II, and III). In: Hamburger Geophysikalische Einzelschriften, Reihe A, Helft 52. Max-Planck Institut für Meteorologie, Hamburg.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J.A., Barnett, T.P., 1985. Computations and parameterizations of the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part 2: parameterizations of the non-linear transfer for application in wave models. *Journal of Physical Oceanography* 15, 1378–1391.
- Heimann, D., 2001. Model-based climatology of the eastern Adriatic coast, *Meteorologische Zeitschrift*, 10, 5–16
- Herbers, T.H.C., Burton, M.C., 1997. Nonlinear shoaling of directionally spread waves on a beach. *Journal of Geophysical Research* 102, 21101–21114.
- Hersbach, H., Janssen, P.A.E.M., 1999. Improvement of short fetch behavior in the WAM model. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 16, 884–892.
- Herterich, K., Hasselmann, K., 1980. A similarity relation for the non-linear energy transfer in a finitedepth gravity-wave spectrum. *Journal of Fluid Mechanics* 97, 215–224.
- Hodur, R.M., Pullen, J., Cummings, J., Hong, X., Doyle, J.D., Martin, P., Rennick, M.A., 2001. The Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS). *Oceanography* 15, 88– 98.
- Holthuijsen, L.H., Herbers, T.H.C., 1986. Statistics of breaking waves observed as whitecaps in the open sea. *Journal of Physical Oceanography* 16, 290–297.
- Holthuijsen, L.H., Booij, N., Herbers, T.H.C., 1989. A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal Engineering* 13, 23–54
- Holthuijsen, L.H., 2007. Waves in Oceanic and Coastal Waters, Cambridge University Press
- Hristov, T.S., Miller, S.D., Friehe, C.A., 2003. Dynamical coupling of wind and ocean waves through wave-induced air flow. *Nature* 442, 55–58.
- Hsu, T.-W., Ou, S.-H., Liau, J.-M., 2005. Hindcasting nearshore wind wave using a FEM code for SWAN. *Coastal Engineering* 52, 177–195.
- Hua, F., Yuan, Y., 1992. Theoretical study of breaking wave spectrum and its application. In: Banner, M.L., Grimshaw, R.H.J. (Eds.), *Breaking Waves*, IUTAM Symposium, Sydney, Australia, 1991. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 277–282.

Hwang, P.A., Xu, D., Wu, J., 1989. Breaking of wind-generated waves: measurements and characteristics. *Journal of Fluid Mechanics* 202, 177–200.

Hwang, P.A., Wang, D.W., 2004. An empirical investigation of source term balance of small scale surface waves. *Geophysical Research Letters* 31, L15301.

Ivatek–Šahdan, S., Tudor, M., 2004. Use of high-resolution dynamical adaptation in operational suite and research impact studies, *Meteorologische Zeitschrift,* 13, 99–108.

Janssen, P.A.E.M., 1982. Quasilinear approximation for the spectrum of wind-generated water waves. *Journal of Fluid Mechanics* 117, 493–506.

Janssen, P.A.E.M., 1989. Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves. *Journal of Physical Oceanography* 19, 745–754.

Janssen, P.A.E.M., 1992. Experimental evidence of the effect of surface waves on the air flow. *Journal of Physical Oceanography* 22, 1600–1604.

Janssen, P.A.E.M., 2003. Nonlinear four-wave interactions and freak waves. *Journal of Physical Oceanography* 33, 863–884.

Janssen, P.A.E.M., 2004. The Interaction of Ocean Waves and Wind. Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 300.

Janssen, P.A.E.M., Onorato, M., 2007. The intermediate water depth limit of the Zakharov equation and consequences for wave prediction. *Journal of Physical Oceanography*, in press.

Janssen, T.T., Battjes, J.A., van Dongeren, A.R., 2003. Long waves induced by short-wave groups over a sloping bottom. *Journal of Geophysical Research* 108 (C8), 3252.

- Jeffreys, H., 1924. On the formation of waves by wind. *Proceedings of the Royal Society A* 107, 189–206.
- Jeffreys, H., 1925. On the formation of waves by wind. II. *Proceedings of the Royal Society A* 110, 341–347.

Jenkins, A.D., Phillips, O.M., 2001. A simple formula for nonlinear wave-wave interaction. International Journal of Offshore and Polar Engineering 11 (2), 81–86.

Jiang, F., Mehta, A.J., 1996. Mudbanks of the southwest coast of India. 5. Wave attenuation. *Journal* of Coastal Research 12 (4), 890–897.

Kagan, B.A., Alvarez, O., Izquierdo, A., 2005. Weak wind-wave/tide interaction over fixed and moveable bottoms: a formulation and some preliminary results. *Continental Shelf Research* 25 (7–8), 753–773.

Kamali, B., Hashim, R., 2009. Recent Advances is Stability Formulae and Damage Description of Breakwater Armour Layer. *Australian Journal of Basic and Applied Science* 3 (3), 2717–2827.

Komatsu, K., 1996. Development of a new generation wave forecasting model bases on a new schema of nonlinear energy transfer among wind waves. Ph.D. Thesis, University of Kyushu, Japan, 155pp. (in Japanese) (unpublished).

Komen, G.J., Hasslemann, S., Hasselmann, K., 1984. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of Physical Oceanography* 14, 1271–1285.

Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P., 1994. Dynamics and Modelling of Ocean Waves. *Cambridge University Press*. p.532.

Kudryavtsev, V.N., Makin, V.K., 2004. Impact of swell on the marine atmospheric boundary layer. *Journal of Physical Oceanography* 34, 934–949.

Lamb, H., 1932. Hydrodynamics, sixth ed. Dover, New York, p. 738.

Lavrenov, I.V., 2001. Effect of wind wave parameter fluctuationon the non-linear spectrum evolution. *Journal of Physical Oceanography* 31, 861–873.

Lavrenov, I.V., 2003a. Numerical study of non-stationary solution of Hasselmann equation. *Journal of Physical Oceanography* 33, 499– 511.

Lavrenov, I.V., 2003b. Wind-waves in Oceans: Dynamics and Numerical Simulations. Springer, Berlin, p. 377.

Lavrenov, I.V., 2004. Weak turbulent fluxes estimation in surface water wave spectrum. In: Proceedings of the 8th International Workshop on Wave Hindcasting & Forecasting, Oahu, Hawaii, November 14–19, 2004, p. 14.

Lavrenov, I.V., Resio, D.T., Zakharov, V.E., 2002. Numerical simulation of weak turbulent Kolmogorov spectrum in water surface waves. *In: 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, Banff, Alberta, Canada, October 21–25, 2002, pp. 1–12.

L. Cavaleri et al./Progress in Oceanography 75 (2007) 603-674.

Lenartz, F., Beckers, J.-M., Chiggiato, J., Troupin, C., Vandenbulcke, L., Rixen, M., 2010. Superesemble techniques applied to wave forecast: performance and limitations. *Ocean Science Discussions* 7, 709–737.

- Lin, R.Q., Perrie, W., 1998. On the mathematics and approximation of the nonlinear wave–wave interactions. In: Perrie, W. (Ed.), *Nonlinear Ocean Waves, Advances in Fluid Mechanics*. Computational Mechanics Publications, Southampton (UK), pp. 61–88.
- Liu, P.C., Babanin, A.V., 2004. Using wavelet spectrum analysis to resolve breaking events in the wind wave time series. *Annales Geophysicae* 22, 3335–3345.
- Longuet-Higgins, M.S., 1969a. On wave breaking and the equilibrium spectrum of wind-generated waves. Proceedings of the Royal Society London A 310, 151–159.
- Longuet-Higgins, M.S., 1969b. A nonlinear mechanism for the generation of sea waves. Proceedings of the Royal Society LondonA 311, 371–389.
- Madsen, H.D., Krenk, S., Lind, N.C., 1986. Methods of structural safety. second dition. Englewood Cliffs (NY). Prentice-Hall Inc.
- Madsen, O.S., Poon, Y.-K., Graber, H.C., 1988. Spectral wave attenuation by bottom friction: theory. In: *Proceedings of the 21th ASCE Coastal Engineering Conference*, pp. 492–504.
- Madsen, P.A., Sørensen, O.R., 1993. Bound waves and triad interactions in shallow water. *Ocean Engineering* 20 (4), 359–388.
- Madsen, P.A., Schäffer, H.A., 1999. A review of Boussinesq-type equations for gravity waves. In: Philip, L.-F., Liu (Eds.). *Advances in Coastal and Ocean Engineering, vol. 5. World Scientific,* Singapore, pp. 1–94.
- Madsen, P.A., Bingham, H.B., Schäffer, H.A., 2003. Boussinesq-type formulations for fully nonlinear and extremely dispersive water waves: derivation and analysis. *Proceedings of the Royal Society of London*, A 459, 1075–1104.
- Makin, V.K., Chalikov, D.V., 1979. Numerical modeling of air structure above waves. Izvestiya Akademii Nauk SSSR, *Atmosphere Ocean Physics* 15, 292–299 (Engl. transl.: Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics, 15, 199–204).
- Makin, V.K., Kudryavtsev, V.N., 2002. Impact of dominant waves on sea drag. *Boundary-Layer Meteorology* 103, 83–99.
- Makin, V.K., Kudryavstev, V.N., Mastenbroek, C., 1995. Drag of the sea surface. *Boundary-Layer Meteorology* 73, 159–182.
- Majewski, D., 1998. The new global icosahedral hexagonal grid point model. GME for Deutscher Wetterdienst. Recent developments in numerical methods and atmospheric modelling. ECMWF Seminar, pp. 173–201.
- Majewsky, D., Liermann, D., Prohl, P., Ritter, B., Buchhold, M., Hanisch, T., Paul, G., Wergen, W., Baumgardner, J., 2002. The opernational global icosahedral – hexagonal gridpoint model GME: description and high resolution tests. *Mon. Weather Rev.* 130, 319-338.
- Mandal, S., Subba, R., Manjunatha, Y.R., Kim, D.H., 2007. Stability analysis of rubble mound breakwater using ANN, Fourth Indian National Conference on Harbour and Ocean Engineering, NITK, Surathkal
- Mase, H., Masanobu, S., Tetsuo, S., 1995. Neural network for stability analysis of rubble mound breakwater. *Journal of waterway, port, coastal and Ocean Engineering* 121 (6), 294–299.
- Mastenbroek, C., 1996. Wind-wave interaction. Ph.D. Thesis. Delft Techology University, 119pp.
- Masuda, A., 1980. Nonlinear energy transfer between wind waves. *Journal of Physical Oceanography* 10, 2082–2093.
- Melville, W.K., 1994. Energy dissipation by breaking waves. *Journal of Physical Oceanography* 24, 2041–2049.
- Méndez, F.J., Menéndez, M., Luceno, A., Medina, R., Graham, N.E., 2008. Seasonality and duration in extreme value distributions of significant wave height. *Ocean Engineering* 35, 131–138.
- Meza, E., Zhang, J., Seymour, R.J., 2000. Free-wave energy dissipation in experimental breaking waves. *Journal of Physical Oceanography* 30, 2404–2418.
- Meza, E., Zhang, J., Olivares, A., Brambila, J., 2002. Third generation wind wave model frequency dependence of the white-capping dissipation source function. In: Proceedings of the 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Oslo, Norway, No. 28051, pp. 1–8.
- Miles, J.W., 1957. On the generation of surface waves by shear flows. *Journal of Fluid Mechanics* 3, 185–204.
- Mínguez, R., Castillo, E., 2009. Reliability-based optimization in engineering using decomposition techniques and FORMS. *Structural Safety* 31, 214–223.
- Mínguez, R., Castillo, E., Castillo, C., Losada, M.A., 2006. Optimal cost design with sensitivity analysis using decomposition techniques. Application to composite breakwaters. *Structural Safety* 28, 321–340.

Ng, C.O., 2000. Water waves over a muddy bed: a two-layer Stokes' boundary layer model. *Coastal Engineering* 40 (3), 221–242.

Nikolayeva, Y.I., Tsimring, L.S., 1986. Kinetic model of the wind generation of waves by a turbulent wind. Izvestiya Russian Academy of Sciences. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics* 22, 102–107.

- Onorato, M., Osborne, A.R., Serio, M., Resio, D., Janssen, P.A.E.M., 2004. Quasi-resonant interactions in shallow water. In: Proceedings of the 8th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, North Shore, Oahu, November, 2004.
- Oost, W.A., Komen, G.J., Jacobs, C.M.J., van Oort, C., 2002. New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during ASGAMAGE. *Boundary-Layer Meteorology* 103, 409–438.
- Papadrakakis, M., Lagaros, N.D., 2002. Reliability–based structural optimization using neural networks and Monte Carlo simulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 191, 3491–3507.
- Peregrine, D.H., 1967. Long waves on a beach. Journal of Fluid Mechanics 27, 815-827.
- Petit, H.A.H., 2001. Diffusion and dispersion of numerical schemes for hyperbolic problems. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, T.U. Delft Faculty of Civil Engineering and Geosciences Report No. 01–04, 217pp.
- Phillips, O.M., 1957. On the generation of waves by turbulent wind. *Journal of Fluid Mechanics* 2, 417–445.
- Phillips, O.M., 1958. The equilibrium range in the spectrum of wind generated waves. *Journal of Fluid Mechanics* 4, 426–434.
- Phillips, O.M., 1960. On the dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude. *Journal of Fluid Mechanics* 9, 193–217.
- Phillips, O.M., 1963. On the attenuation of long gravity waves by short breaking waves. *Journal of Fluid Mechanics* 16, 321–332.
- Phillips, O.M., 1981a. Wave interactions The evolution of an idea. *Journal of Fluid Mechanics* 106, 5–227.
- Phillips, O.M., 1981b. The dispersion of short wavelets in the presence of a dominant long wave. *Journal of Fluid Mechanics* 107, 465–485.
- Phillips, O.M., 1985. Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics* 156, 505–531.
- Phillips, O.M., Posner, F.L., Hansen, J.P., 2001. High range resolution radar measurements of the speed distribution of breaking events in wind-generated ocean waves: surface impulse and wave energy dissipation rates. *Journal of Physical Oceanography* 31, 450–460.
- Pierson, W.J., Neumann, G., James, R.W., 1955. Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics. *U.S. Navy Hydrographic Office Pub.* No. 603.
- Pirazzoli, P.A., Tomasin A., 1999. Recent abatement of easterly wind in the northern Adriatic, *International Journal of Climatology*, 19, 1205–1219.
- Piscopia, R., Polnikov, V., De Girolamo, P., Magnaldi, S., 2003. Validation of the three-wave quasikinetic approximation for the spectral evolution in shallow water. *Ocean Engineering* 30, 579– 599.
- Polnikov, V.G., 1993. On a description of a wind–wave energy dissipation function. In: Donelan, M.A., Hui, W.H., Plant, W.J. (Eds.), *The Air–sea Interface. Radio and Acoustic Sensing, Turbulence and Wave Dynamics.* Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami, Miami, FL, pp. 277–282.
- Polnikov, V.G., 1997. Nonlinear energy transfer through the spectrum of gravity waves for the finite depth case. *Journal of Physical Oceanography* 27, 1481–1491.
- Polnikov, V.G., 2000. Numerical experiments based on a three-wave quasi-kinetic model for describing the evolution the spectrum of shallow-water waves. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics* 36, 510–521.
- Polnikov, V.G., 2002. A basing of the diffusion approximation derivation for the four-wave kinetic integral and properties of the approximation. *Nonlinear Processes in Geophysics* 9, 355–366.
- Polnikov, V.G., 2003. The choice of optimal discrete interaction approximation to the kinetic integral for ocean waves. *Nonlinear Processes in Geophysics* 10, 425–434.
- Polnikov, V.G., Farina, L., 2002. On the problem of optimal approximation for the four-wave kinetic integral. *Nonlinear Processes in Geophysics* 9, 497–512.

- Pullen, J., Doyle, J., Hodur, R., Ogston, A., Book, J., Perkins, H., Signell, R.P., 2003. Coupled ocean – athmosphere nested modeling of Adiatic Sea during winter and spring 2001. *Journal of Geophysical Research* 108 (C10).
- Pushkarev, A., Resio, D.T., Zakharov, V.E., 2004. Second generation diffusion model of interacting gravity waves on the surface of deep fluid. *Nonlinear Processes in Geophysics* 11, 329–342.
- Rao, S., Mandal, S., 2005. Hind casting of storm waves using neural networks. *Journal of Ocean Engineering, Elsevier* 32, 667–684.
- Resio, D.T., Perrie, W., 1991. A numerical study of nonlinear energy fluxes due to wave-wave interactions. Part 1: Methodology and basic results. *Journal of Fluid Mechanics* 223, 609–629.
- Resio, D.T., Perrie, W., 2006. A two-scale approximation for effcient representation of nonlinear energy transfers in a wind wave spectrum. In: Proceedings of the 9th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Victoria, BC, Canada, 24–29 September.
- Resio, D.T., Pihl, J.H., Tracy, B.A., Vincent, C.L., 2001. Non-linear energy fluxes and the finite depth equilibrium range wave spectra. *Journal of Geophysical Research* 106 (C4), 6985–7000.
- Riley, D.S., Donelan, M.A., Hui, W.H., 1982. An extended Miles' theory for wave generation by wind. Boundary-Layer Meteorology 22, 209–225.
- Saffman, P.G., 1967. Discussion on "Nonlinear interactions treated by the methods of theoretical physics" by K. Hasselmann. Proceedings of the Royal Society of London 299, 101–103.
- Schäffer, H.A., Madsen, P.A., Deigaard, R., 1993. A Boussinesq model for wave breaking in shallow water. *Coastal Engineering* 20, 185–202.
- Schneggenburger, C., Gunther, H., Rosenthal, W., 2000. Spectral wave modelling with nonlinear dissipation: validation and applications in a coastal tidal environment. *Coastal Engineering* 41, 201–235.
- Shemdin, O., Hasselmann, K., Hsiao, S.V., Heterich, K., 1978. Nonlinear and linear bottom interaction effects in shallow water. In: Favre, A., Hasselmann, K. (Eds.), *Turbulent Fluxes Through the Sea Surface, Wave Dynamics and Prediction*, NATO Conference Series V. Plenum Press, New York, pp. 347–365.
- Signell, R.P., Carniel, S., Cavaleri, L., Chiggiato, J., Doyle, J.D., Pullen, J., Sclavo, M., 2005. Assessment of wind quality for oceanographic modelling in semi-enclosed basins. *Journal of Marine Systems* 53, 217–233.
- Smith, S.D., Anderson, R.J., Oost, W.A., Kraan, C., Maat, N., DeCosmo, J., Katsaros, K.B., Davidson, K.L., Bumke, K., Hasse, L., Chadwick, H.M., 1992. Sea surface wind stress and drag coeffcients: the HEXOS results. *Boundary-Layer Meteorology* 60, 109–142.
- Snyder, R.L., 1974. A field study of wave-induced pressure fluctuation above surface gravity waves. Journal of Marine Research 32, 497–531.
- Snyder, R.L., Dobson, F.W., Elliott, J.A., Long, R.B., 1981. Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics* 102, 1–59.
- Snyder, R.L., Thacker, W.C., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Barzel, G., 1993. Implementation of an effcient scheme for calculating nonlinear transfer from wave–wave interactions. *Journal of Geophysical Research* 98 (C8), 14507–14525.
- Stokes, G.G., 1847. On the theory of oscillatory waves. *Transactions of the Cambridge Philosophical* Society 8, 441–455.
- Sullivan, P., McWilliams, J., Moeng, C.-H., 2000. Simulation of turbulent flow over idealized water waves. *Journal of Fluid Mechanics* 404, 47–85.
- Sverdrup, H.U., Munk, W.H., 1946. Empirical and theoretical relations between wind, sea and swell. *Transactions, American Geophysical Union* 27 (6), 823–827.
- Sverdrup, H.U., Munk, W.H., 1947. Wind, sea, and swell: theory of relations for forecasting. U.S. Navy Hydrographic Office Report 601, 50p.
- SWAMP Group, 1985. Ocean Wave Modeling. Plenum Press, New York, p. 266.
- Teixeira, M.A.C., Belcher, S.E., 2002. On the distortion of turbulence by a progressive surface wave. *Journal of Fluid Mechanics* 458, 229–267.
- Terray, E.A., Donelan, M.A., Agrawal, Y.C., Drennan, W.M., Kahma, K.K., Williams III, A.J., Hwang, P.A., Kitaigorodskii, S.A., 1996. Estimates of kinetic energy dissipation under breaking waves. *Journal of Physical Oceanography* 26, 792–807.
- Thorpe, S.A., 1993. Energy loss by breaking waves. *Journal of Physical Oceanography* 23, 2498–2502.
- Tolman, H.L., 1991. A third generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents. *Journal of Geophysical Research* 21, 782–797.
- Tolman, H.L., 1992a. An evaluation of expressions for wave energy-dissipation due to bottom friction in the presence of currents. *Coastal Engineering* 16 (2), 165–179.

- Tolman, H.L., 1992b. Effects of numerics on the physics in a third-generation wind-wave model. *Journal of Physical Oceanography* 22, 1095–1111.
- Tolman, H.L., 2002a. Alleviating the Garden Sprinkler effect in wind wave models. *Ocean Modeling* 4, 269–289.
- Tolman, H.L., 2002b. Limiters in third-generation wind wave models. *The Global Atmosphere and Ocean System* 8, 67–83.
- Tolman, H.L., 2002c. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 2.22. Technical Report 222, NOAA/NWS/ NCEP/MMAB.

Tolman, H.L., 2004. Inverse modeling of Discrete Interaction Approximations for nonlinear interactions in wind waves. *Ocean Modelling* 6, 405–422.

- Tolman, H.L., Chalikov, D., 1996. Source terms in a third-generation wind wave model. *Journal of Physical Oceanography* 26, 2497–2518.
- Tolman, H.L., Krasnopolsky, V.M., 2004. Nonlinear interactions in practical wind waves models. In: Proceedings of the Eighth International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, North Shore, Oahu, Hawaii, November 14–19, 2004, WMO/TD-No. 1319, JCOMM Technical Report Series No. 29.
- Tracy, B.A., Resio, D.T., 1982. Theory and calculation of the nonlinear energy transfer between sea waves in deep water. WIS Technical Report 11, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, USA
- Tsimring, L.Sh., 1983. Induced scattering of surface wind waves. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics* 19, 47–50.
- Tulin, M.P., Waseda, T., 1999. Laboratory observations of wave group evolution, including breaking effects. *Journal of Fluid Mechanics* 378, 197–232.
- Van Dantzig, D., 1956. Economic decision problems for flood prevention. *Econometrica* 24, 276-287.
- Van der Meer, J.W., 1987. Stability of breakwater armour layers Design formulae. Costal Engineering 11 (3), 219–239.
- Van der Meer, J.W., 1988a. Rock slopes and gravel beaches under wave attack, Ph.D. thesis. Delft University of Technology, No. 396.
- Van Duin, C.A., Janssen, P.A.E.M., 1992. An analytic model of the generation of surface gravity waves by turbulent air flow. *Journal of Fluid Mechanics* 236, 197–215.
- Van Vledder, G.Ph., 2001a. Improved algorithms for computing nonlinear quadruplet wave-wave interactions in deep and shallow water. In: Proceedings ECMWF Workshop on Ocean Wave Forecasting, Reading, UK, 2–4 July.
- Van Vledder, G.Ph., 2001b. Extension of the Discrete Interaction Approximation for computing nonlinear quadruplet wave-wave interactions in operation wave models. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Ocean Waves, Measurements and Analysis (WAVES'2001), San-Francisco, CA, USA, pp. 540–549.
- Van Vledder, G.Ph., 2006. The WRT method for the computation of non-linear four-wave interaction in discrete spectral wave models. *Coastal Engineering* 53, 223–242.
- Van Vledder, G.Ph., Weber, S.L., 1988. Guide to the program EXACT-NL. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Report No. 20.
- Van Vledder, G.Ph., Holthuijsen, L.H., 1993. The directional response of ocean waves to turning winds. *Journal of Physical Oceanography* 23, 177–192.
- Vidal, C., Losada, M.A., Mansard, E.P.D., 1995. Suitable wave hight parameter for characterizing breakwater stability. *Journal of waterway port coastal and ocean engineering*, ASCE, 121 (2), 88–97.
- Vidal, C., Martin, F.L., Negro, V., Gironella, J., Madrigal, B., García-Palacios, J., 2003. Measurement of armor damage on rubble mound structures: comparison between different methodologies. Proceedings Coastal Structures 2003. Conference. Portland, Oregon
- Vidal, C., Medina, R., Lomónaco, P., 2006. Wave hight parameter for damage description of rubblemound breakwaters. *Coastal Engineering* 53 (92), 711–722.
- Voortman, H.G., Kuijper, H.K.T., Vrijling, J.K., 1998. Economic optimal design of vertical breakwaters. Proceedings of the 26th internacional coastal engineering conference (ICCE) vol.2, ASCE, 2114–2137.
- WAMDI Group, 1988. The WAM model a third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography* 18, 1775–1809.
- Webb, D.J., 1978. Nonlinear transfer between sea waves. Deep-Sea Research 25, 279–298.
- Weber, S.L., 1991. Eddy-viscosity and drag-law models for random ocean wave dissipation. *Journal* of *Fluid Mechanics* 232, 73–98.

Wei, G., Kirby, J.T., Grilli, S.T., Subramanya, R., 1995. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves. *Journal of Fluid Mechanics* 294, 71– 92.

Winterwerp, J.C., de Graaff, R.F., Groeneweg, J., Luyendijk, A.P., 2007. Modelling of wave damping at Guyana mud coast. *Coastal Engineering* 54 (3), 249–261.

- Wolf, J., Prandle, D., 1999. Some observations of wave-current interaction. *Coastal Engineering* 37 (3-4), 471-485.
- Yagci, O., Mercan, D.E., Cigizouglu, H.K., Kabdasli, M.S., 2005. Artificial intelligence methods in breakwater damage ratio estimation. *Ocean Engineering* 32, 2088–2106.
- Yokoyama, N., 2004. Statistics of gravity waves obtained by direct numerical simulation. *Journal of Fluid Mechanics* 501, 169–178.
- Young, I.R., Banner, M.L., 1992. Numerical experiments on the evolution of fetch limited waves. In: Banner, M.L., Grimshaw, R.H.J. (Eds.), Breaking Waves, IUTAM Symposium, Sydney, Australia, 1991. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 267–275.
- Young, I.R., Babanin, A.V., 2006. Spectral distribution of energy dissipation of wind-generated waves due to dominant wave breaking. *Journal of Physical Oceanography* 36 (3), 376–394.
- Yuan, Y., Tung, C.C., Huang, N.E., 1986. Statistical characteristics of breaking waves. In: Phillips, O.M., Hasselmann, K. (Eds.), *Wave Dynamics and Radio Probing of the Ocean Surface*. Plenum Press, New York, pp. 265–272.
- Zakharov, V., 1968. Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep fluid. *Journal of Applied Mechanics* 4, 86–94.
- Zakharov, V., 1999. Statistical theory of gravity and capillary waves on the surface of a finite-depth fluid. *European Journal of Mechanics B Fluids* 18, 327–344.
- Zakharov, V.E., Pushkarev, A.N., 1999. Diffusion model of interacting gravity waves on the surface of a deep fluid. *Nonlinear Processesin Geophysics* 6, 1–10.
- Zaslavskii, M.M., Polnikov, V.G., 1998. Three-wave quasi-kinetic approximation in the problem of the evolution of a spectrum of nonlinear gravity waves at small depths. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 34, 609–616.

DODATAK A – Podaci dobiveni mjerenjem valnih visina na valografima, Jadranski projekt (Andročec i sur.)



Značajne i maksimalne valne visine zabilježene na mjestu valografa V1





Značajne i maksimalne valne visine zabilježene na mjestu valografa V2

DODATAK B – Jadranski model – najzanimljivije situacije polja vjetra i odgovarajuća polja valnih visina po godinama

U nastavku su prikazane neke od najzanimljivijih situacija modeliranih polja značajnih valnih visina na području Jadrana dobivenih iz podataka o vjetru iz prognostičkog modela ALADIN. Na temelju analize ovih i sličnih situacija formirana je metodologija odabira situacija za dugoročnu prognozu valne klime Jadrana.

Općenito iz svih ovih situacija može se vidjeti problem diskontinuiteta vjetra i po smjeru i po jačini duž Jadrana zbog čega je u odabiru karakterističnih situacija odabrana podjela Jadrana na sjeverni, srednji i južni Jadran. Također iz nekih situacija je vidljivo da u slučaju dominantnog smjera npr. juga na južnom Jadranu, neovisno o smjeru vjetra na sjevernom Jadranu, valovi se šire u smjeru juga. S druge strane bura na sjevernom Jadranu često je strogo lokalnog karaktera.


















































DODATAK C – Tablice učestalosti vjetra po postajama korištenim u definiranju modela raspodjele brzina vjetra s mjernih postaja na polje vjetra

Dodatak C

DODATAK D – Formiranje modela raspodjele brzine vjetra s mjernih postaja na polje brzina vjetra

Za dugoročnu prognozu povratnog razdoblja 100 godina potrebna su opažanja u trajanju minimalno 30 godina. Obzirom da se vjetrovnim poljima iz prognostičkog modela ALADIN raspolaže samo u periodu od 1992. do 2001., ti podaci su nedostatni za navedenu prognozu. No, oni su iskorišteni za definiranje raspodjele vjetra s diskretnih točaka (mjernih postaja) na cijelo područje lokalnog modela. Za splitsko područje na raspolaganju su mjerne postaje Split-Marjan ($\phi = 43^{0}31$ 'N i $\lambda = 16^{0}26$ 'E, H=122m n.m.), Hvar ($\phi = 43^{0}10$ 'N i $\lambda = 16^{0}27$ 'E, H=20m n.m.) i Makarska ($\phi = 43^{0}17$ 'N i $\lambda = 17^{0}1$ 'E, H=52m n.m.) u periodu od 01.01.1992. do 31.12.2007., a postaja Split-Marjan i ranije od 01.01.1966. (slika D-1)



Slika D-1 Prostorni raspored mjernih postaja i karakterističnih točaka u kojima su provedene preliminarne analize zavisnosti brzine vjetra u polju i brzine vjetra na postajama

Dakle, ideja je za dugoročnu prognozu iskoristiti djelomično podatke sa sve tri postaje, a djelomično samo s postaje Split-Marjan. U tu svrhu provedena je statistička obrada podataka kako bi se uspostavila veza između vrijednosti u svakom elementu (2kmx2km) definiranog numeričkog modela i podataka na mjernim postajama.

Prvi korak u tom postupku je određivanje načina opisivanja veze između podataka o vjetru dobivenih ALADINom i onih s mjernih postaja, za svaku postaju zasebno. Analiza je provedena za 4 odabrane karakteristične točke (slika D-1) kao indikatore za određena područja, u kojima se očekuje moguće različito ponašanje obzirom na geografski položaj i konfiguraciju terena. Na temelju preliminarnih analiza i grafičkih prikaza stohastičke zavisnost navedenih slučajnih varijabli ovisno o smjeru puhanja vjetra i neovisno o smjeru zaključeno je da se može pretpostaviti linearna ili eksponencijalna zavisnost po točkama ovisno o smjeru i položaju.

Za tako odabrane zavisnosti pretpostavljen je oblik funkcije koja opisuje slučajnu varijablu y (iznos brzine vjetra u pojedinom prostornom elementu područja) preko slučajne varijable x (iznos brzine vjetra na pojedinoj postaji) u obliku

 $y = a + b \cdot x ,$

 $y = a \cdot e^{b^x}$,

kada se promatra zavisnost s jednom od postaja, odnosno u obliku

 $y = a + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3,$ $y = a \cdot e^{b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3}$

kada se promatra istovremena zavisnost sa sve tri postaje.

Rezultati dobiveni za svaki smjer, te neovisno o smjeru za vezu preko svake pojedine postaje i za slučaj kada se pretpostavlja poznavanje u sve tri postaje prikazani su u nastavku.

U tablici D-1 je dan prikaz oznaka smjerova vjetra korištenih u grafičkim prikazima, preuzetim iz nomenklature Državnog hidrometeorološkog zavoda.

oznaka	S4	S8	S12	S16	S20	S24	S28	S32
smjer	NE	E	SE	S	Sw	W	NW	Ν
Tablica D-1 Oznake smjerova vjetra korištene u grafičkim prikazima								

Detaljna analiza odabira između linearne i eksponencijalne zavisnosti za karakteristične smjerove (NE i SE) odnosno njen grafički prikaz dan je u Dodatku D1. Nakon provedenih analiza po točkama uočeno je da se može koristiti linearna zavisnost, obzirom da za praktičnu primjenu nema bitne razlike, štoviše u područjima većih brzina vjetra (zanimljivim za analizu valova) linearna zavisnost daje realnije rezultate.

Analiziran je i utjecaj odabira ulaznih podataka, odnosno provedena je i preliminarna analiza samo s podacima s brzinama vjetra većim od 5m/s koje su od interesa kod opisa problema ekstremnih situacija vjetra zanimljivih u prognoziranju valova. No, na slici D-2 se može vidjeti da analize provedene na svim podacima u području brzina većim od 15m/s (zanimljivim za generiranje valova) kod eksponencijalne zavisnosti daju rezultate na strani sigurnosti, a kod linearne zavisnosti razlike su neznatne, te je za daljnju analizu odabrano korištenje svih podataka.



Slika D-2 Linearna i eksponencijalna interpolacija zavisnosti brzine vjetra na postaji Split-Marjan i brzine vjetra definirane prognostičkim modelom ALADIN u točki T1 u smjeru NE (S4) i smjeru SE (S12) uz korištenje svih podataka i uz korištenje samo brzina većih od 5m/s

Isto tako na slikama D-3 su prikazani i pripadni koef. korelacije po postajama i smjerovima u sve četiri analizirane točke. Iz kojih je vidljivo da su rezultati linearne zavisnosti u većini slučajeva (analizirano po točkama i po smjerovima) povoljniji.









Slika D-3 Linearni koef. korelacije po postajama i smjerovima u promatranim točkama T1-T4 u slučaju pretpostavljene linearne i eksponencijalne zavisnosti

Na temelju gornjih dijagrama koeficijenata korelacije izraženih po smjerovima i u dodatku D2 prikazanim slikama linearne zavisnosti po smjerovima u svakoj točki može se zaključiti da je potrebno provoditi analize po smjerovima. Naime iz dijagrama koeficijenta korelacije očigledno je da se oni po smjerovima znatno razlikuju, a isto tako iz slika u dodatku D2 vidljivo je da su odstupanja po smjerovima i do 50% iznosa brzine vjetra što nije prihvatljivo za daljnje analize.

Slično su provedene i analize po točkama uz istovremeno korištenje podataka sa sve tri mjerne postaje. Problem koji se ovdje javlja je da kroz 10 godina postoje smjerovi vjetra za koje nije zabilježena niti jedna ili svega nekoliko situacija istovremenog puhanja u sve tri postaje i odabranim točkama T1 do T4 (i to uglavnom vjetrovi zapadnog smjera) pa je analiza provedena za dva karakteristična smjera buru (NE) i jugo (SE). Postavlja se pitanje da li je moguće i koliko kvalitetno definirati zavisnost o tri postaje na temelju relativno malog broja podataka (do 10 situacija godišnje), te koliko je realno formirati takve situacije, obzirom da se praktički smjer vjetra mijenja znatno dinamičnije nego što model pretpostavlja.

U nastavku je provedena usporedba rezultata dobivenih svakim od četiri definirana modela linearne zavisnosti preko svake od mjernih postaja i modela linearne zavisnosti preko sve tri postaje istovremeno. Na slikama D-4 su prikazane vrijednosti koje opisuju model definiran preko samo jedne postaje (plave, zelene i crvene točke), dok je crnom prikazana ovisnost preko sve tri točke u stvarnim situacijama u kojima je zabilježeno istovremeno puhanje vjetra iz promatranog smjera (usporedba vrijednosti prognostičkog modela ALADIN i definiranog modela raspodjele brzine vjetra s mjernih postaja na vjetrovno polje). Iz slika je vidljivo da općenito sva četiri modela podjednako točno opisuju vrijednosti dobivene prognostičkim modelom ALADIN. Iznimno loše rezultate daje model preko postaje Makarska za smjer juga u točki T1, dok je u točki T2 za smjer bure na raspolaganju relativno mali broj situacija koje su pak relativno loše opisane modelom preko 3 postaje.



Slika D-4 Prikaz rezultata dobivenih različitim modelima u promatranim točkama T1-T4 za smjerove bure (NE-S4) i juga (SE-S12)

Zaključak ovog djela analize je da je model definiran za po jednu postaju definiran na temelju znatno većeg broja podataka od modela definiranog preko podataka o vjetru s 3 postaje realnije opisuje brzine vjetra, a primjenjiv je u svim smjerovima, za razliku od modela opisanog preko 3 postaje koji je moguće formirati samo za smjerove NE (S4) i SE (S12). U nastavku je istraživanje usmjereno na pokušaj definiranja područja utjecaja pojedinih postaja po smjerovima.

U tom smislu je na temelju dosadašnjih zaključaka provedena analiza po cijelom polju, i to uz pretpostavku linearne zavisnosti sa po jednom postajom sa zasebnim modelima po smjerovima. Kao relevantni podatak za definiranje konačnog modela odabran je koef. korelacije. Dobiveni rezultati grafički su prikazani u dodatku D3, i to za slučaj linearne zavisnosti ovisno o smjeru i ovisno o postajama.

Iz prikazanih polja koeficijenta korelacije može se zaključiti da smjer NE dobro opisuju postaje Split-Marjan i Hvar s koef. korelacije većim od 0,5 na skoro cijelom području, s tek nešto manjim područjima loših karakteristika. Pri tom su vrijednosti postaje Split-Marjan nešto ujednačenije. Smjer E najbolje opisuje postaja Split-Marjan, no problemi u opisu se javljaju na kopnenom području što je zbog konfiguracije terena i za očekivati, no s druge strane nije relevantno za generiranje valova pa nema značajnu ulogu u samom modelu. Smjer SE sve postaje korektno opisuju, no bitno je da postaja Split-Marjan u većem dijelu polja ima koef. korelacije veći od 0,85. Smjer S postaje Split-Marian i Hvar opisuju vrlo dobro s koef, korelacije većim od 0.85. dok postaja Makarska daje nešto lošije rezultate s koef. korelacije oko 0,65 i područjima izrazito lošeg opisa s koef. korelacije manjim od 0,35. Smjer SW zadovoljavajuće opisuje samo postaja Hvar, no i u tom slučaju koef. korelacije tek je nešto veći od 0,55. Smjer W praktički je nemoguće opisati, na gotovo cijelom području sve tri postaje daju koef. korelacije manji od 0,5. Smjer NW postaja Split-Marjan opisuje prihvatljivo s koef. korelacije uglavnom većim od 0,65, dok postaje Hvar i Makarska daju izuzetno loše rezultate s koef. korelacije manjim od 0,35. Smjer N isto tako postaja Split-Marjan opisuje relativno prihvatljivo s koef. korelacije većim od 0,65, dok postaje Hvar i Makarska ponovno daju lošije rezultate s koef. korelacije uglavnom manjim od 0,5. Očigledno je da mjerne postaje Hvar i Makarska daju loše rezultate čak i na relativno uskom području oko same lokacije, što se tumači kao posljedica lošeg smještaja mjernog uređaja na samoj lokaciji.

Na temelju provedenih analiza odabran je model opisa valnog polja preko postaje Split-Marjan uz pretpostavku linearne zavisnosti. Ovaj model u nastavku je analiziran sa stajališta generiranja valova.

DODATAK D1 – Prikaz definirane linearne i eksponencijalne zavisnosti za karakteristične smjerove (NE i SE) ovisno o mjernim postajama po točkama T1-T4.





Točka T1 – postaja Hvar



Točka T1 – postaja Makarska



Točka T2 – postaja Split-Marjan







Točka T2 – postaja Makarska



Točka T3 – postaja Split-Marjan







Točka T3 – postaja Makarska



Točka T4 – postaja Split-Marjan







Točka T4 – postaja Makarska



DODATAK D2 – Prikaz definiranih linearnih zavisnosti po postajama i točkama T1-T4 ovisno o smjerovima





DODATAK D3 – Koeficijenti korelacije po smjerovima i po postajama



Smjer NE -postaja ST-Marjan, Hvar, Makarska (redom)

Scale 1:1140000

0

0



Smjer E –postaja ST-Marjan, Hvar, Makarska (redom)





Below







Smjer S –postaja ST-Marjan, Hvar, Makarska (redom)

Scale 1:1140000



Smjer SW -postaja ST-Marjan, Hvar, Makarska (redom)





Scale 1:1140000

0

0



Smjer W – postaja ST-Marjan, Hvar, Makarska (redom)





Scale 1:1140000

0 - 0.15 Below



Smjer NW – postaja ST-Marjan, Hvar, Makarska (redom)



(kilometer)

0

0



Smjer N -postaja ST-Marjan, Hvar, Makarska (redom)

Scale 1:1140000

DODATAK E – Dugoročna valna klima Jadrana po smjerovima za različita povratna razdoblja



Slika E-1 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer N



Slika E-2 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer N



Slika E-3 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer N



Slika E-4 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer NE



Slika E-5 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer NE



Slika E-6 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer NE



Slika E-7 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer E



Slika E-8 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer E


Slika E-9 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer E



Slika E-10 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer SE



Slika E-11 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer SE



Slika E-12 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer SE Napomena: Karte valova smjer SE povratnog razdoblja 20 i 50 godina prikazane su radi preglednosti u skali različitoj od ostalih karata.



Slika E-13 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer S



Slika E-14 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer S



Slika E-15 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer S



Slika E-16 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer SW



Slika E-17 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer SW



Slika E-18 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer SW



Slika E-19 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer W



Slika E-20 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer W



Slika E-21 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer W



Slika E-22 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 10 godina, smjer NW



Slika E-23 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 20 godina, smjer NW



Slika E-24 Valna klima Jadrana povratnog razdoblja 50 godina, smjer NW

DODATAK F – Detaljan opis postupka ispitivanje stanja školjere i proračuna valnih visina "preživljavanja" lukobrana

Detaljan opis postupka ispitivanja stanja školjere na snimljenim lukobranima (poglavlje 6) prikazan je na primjeru lukobrana Kaše u Dubrovniku. (slika F-1)



Slika F-1 Makrolokacija i mikrolokacija lukobrana Kaše

Terenska ispitivanja su provedena na četiri kontrolna profila školjere PPR 1, PPR 2, PPR 3, PPR 4 (slika F-2). Između tih profila ispitivanje nije provedeno pod pretpostavkom da su uvjeti između profila slični onima unutar profila. Svaki profil čini traka širine 3,5 m od krune do nožice pokosa. Za svaku sekciju su zasebno tablično i grafički prikazane sve granulometrijske značajke.



Slika F-2 Položaj profila PPR1 do PPR4 na lukobranu Kaše

Konstrukcija granulometrijske krivulje

Tablica F-1 prikazuje formular opažanja veličina kamenih blokova po profilima. Mase kamenih blokova prikazanih u prethodnoj tablici su izračunate kao:

$$W = \rho_{kam} \cdot D^3 \cdot \frac{\pi}{6} = 0,524 \cdot \rho_{kam} \cdot D^3 \tag{G-1}$$

uz srednju gustoću kamenog bloka $\rho_{kam} = 2.6 t / m^3$.

Temeljem opažanja prikazanih u tablici F-1 definirana je tablica F-2 granulometrijskog sastava za svaku sekciju pojedinog profila, a potom su i nacrtani grafovi granulometrijskih krivulja po sekcijama profila prikazani na slici F-3.

Parametri za crtanje graničnih krivulja projektiranog područja granulacije definirani su u tablici F-3, a vrijednosti po profilima su prikazane u tablici F-4.

kategorija mase kamenog bloka školjere		promjer kamenog bloka: od D _{dol.gr.} do D _{gor.gr.}	registracija broja pojavljivanja veličina promjera	broj komada	
			PROFIL PPR1		
1	0,1-0,5[t]	0,3 [t]	0,42 [m] do 0,72 [m]		9
2	0,5-1[t]	0,75[t]	0,73 [m] do 0,90 [m]		14
3	1-2 [t]	1,5 [t]	0,91 [m] do 1,14 [m]		9
4	2-3 [t]	2,5 [t]	1,15 [m] do 1,30 [m]		6
5	3-4 [t]	3,5 [t]	1,31 [m] do 1,43 [m]		4
6	4-6 [t]	5,0 [t]	1,44 [m] do 1,64 [m]	l	1
7	6-8 [t]	7,0 [t]	1,65 [m] do 1,80 [m]	l	1
8	8-10 [t]	9,0 [t]	1,81 do 1,94		1
	ukupno			Nr=	45
			PROFIL PPR2	•	
1	0,1-0,5[t]	0,3 [t]	0,42 [m] do 0,72 [m]		29
2	0,5-1[t]	0,75[t]	0,73 [m] do 0,90 [m]		21
3	1-2 [t]	1,5 [t]	0,91 [m] do 1,14 [m]		17
4	2-3 [t]	2,5 [t]	1,15 [m] do 1,30 [m]		3
5	3-4 [t]	3,5 [t]	1,31 [m] do 1,43 [m]		1
6	4-6 [t]	5,0 [t]	1,44 [m] do 1,64 [m]	I	
7	6-8 [t]	7,0 [t]	1,65 [m] do 1,80 [m]	l	
8	8-10 [t]	9,0 [t]	1,81 do 1,94	l	
	ukupno			Nr=	71
			PROFIL PPR3	I	
1	0,1-0,5[t]	0,3 [t]	0,42 [m] do 0,72 [m]		17
2	0,5-1[t]	0,75[t]	0,73 [m] do 0,90 [m]		21
3	1-2 [t]	1,5 [t]	0,91 [m] do 1,14 [m]		16
4	2-3 [t]	2,5 [t]	1,15 [m] do 1,30 [m]		7
5	3-4 [t]	3,5 [t]	1,31 [m] do 1,43 [m]		2
6	4-6 [t]	5,0 [t]	1,44 [m] do 1,64 [m]	I	
7	6-8 [t]	7,0 [t]	1,65 [m] do 1,80 [m]	I	
8	8-10 [t]	9,0 [t]	1,81 do 1,94	l	
	ukupno			Nr=	63
			PROFIL PPR4	1	
1	0,1-0,5[t]	0,3 [t]	0,42 [m] do 0,72 [m]		20
2	0,5-1[t]	0,75[t]	0,73 [m] do 0,90 [m]		12
3	1-2 [t]	1,5 [t]	0,91 [m] do 1,14 [m]		9
4	2-3 [t]	2,5 [t]	1,15 [m] do 1,30 [m]	11111	13
5	3-4 [t]	3,5 [t]	1,31 [m] do 1,43 [m]		5
6	4-6 [t]	5,0 [t]	1,44 [m] do 1,64 [m]	l	
7	6-8 [t]	7,0 [t]	1,65 [m] do 1,80 [m]	l	
8	8-10 [t]	9,0 [t]	1,81 do 1,94	l	
	ukupno			Nr=	59

Tablica F-1 Formular opažanja veličina kamenih blokova nad morem.

kategorija kamenog bloka	promjer kamenog bloka	masa prosječnog bloka	komada	masa frakcije	sumarne mase	postotak blokova manjih od Wgor.gr.			
i	D _{dol.gr} D _{gor.gr.}	Wi=0,5* (Wi dol.gr.+Wi gor. gr.)	n	Sw _i =W _i *n	SSWi	р			
	[m]	[t]	[kom]	[t]	[t]	[%]			
		PROFIL F	PR1						
1	0.42 do 0.72	03	0	27	27	3 5 2%			
2	0,42 d0 0,72	0,3	14	10.5	13.2	17 21%			
3	0,75 d0 0,50	15	9	13.5	26.7	34 81%			
4	1 15 do 1 30	2.5	6	15	41.7	54.37%			
5	1,31 do 1,43	3.5	4	14	55.7	72.62%			
6	1.44 do 1.64	5	1	5	60,7	79,14%			
7	1.65 do 1.80	7	1	7	67,7	88,27%			
8	1,81 do 1,94	9	1	9	76,7	100,00%			
PROFIL PPR2									
1	0,42 do 0,72	0.3	29	8,7	8,7	14,27%			
2	0,73 do 0,90	0,75	21	15,75	24,45	40,11%			
3	0,91 do 1,14	1,5	17	25,5	49,95	81,95%			
4	1,15 do 1,30	2,5	3	7,5	57,45	94,26%			
5	1,31 do 1,43	3,5	1	3,5	60,95	100,00%			
6	1,44 do 1,64	5							
7	1,65 do 1,80	7							
8	1,81 do 1,94	9							
		PROFIL P	PR3						
1	0,42 do 0,72	0,3	17	5,1	5,1	7,35%			
2	0,73 do 0,90	0,75	21	15,75	20,85	30,06%			
3	0,91 do 1,14	1,5	16	24	44,85	64,67%			
4	1,15 do 1,30	2,5	7	17,5	62,35	89,91%			
5	1,31 do 1,43	3,5	2	7	69,35	100,00%			
6	1,44 do 1,64	5							
7	1,65 do 1,80	7							
8	1,81 do 1,94	9							
		PROFIL P	PR4						
1	0,42 do 0,72	0,3	20	6	6	7,64%			
2	0,73 do 0,90	0,75	12	9	15	19,11%			
3	U,91 do 1,14	1,5	9	13,5	28,5	36,31%			
4	1,15 00 1,30	2,5	13	32,5	61 70 5	11,11%			
5	1,31 00 1,43	3,5 F	0	17,5	/8,5	100,00%			
0 7	1,44 UU 1,04	3 7	\sim						
/ 	1 81 do 1 94	7 Q							

Tablica F-2 Granulometrijski sastav po profilima



Slika F-3 Granulometrijska krivulja školjere po profilima (gornji red PPR1 i PPR2, donji red PPR3 i PPR4)

ELCL p<2%	LCL 0% <p<10%< th=""><th>UCL 70%<p<100%< th=""><th>EUCL 97%<p< th=""></p<></th></p<100%<></th></p<10%<>	UCL 70% <p<100%< th=""><th>EUCL 97%<p< th=""></p<></th></p<100%<>	EUCL 97% <p< th=""></p<>				
p - p	p - postotak prolaznosti blokova iskazan kumulativno						
0,02 W _{50%}	0,125 W _{50% CERC7-205} (0,1 W _{50%})	$2 \mathrm{W}_{50\%}$	4 W _{50% CERC7-205} (3 W _{50%})				

Tablica F-3 Standardne granice široko graduirane granulometrijske krivulje primarnog sloja školjere

	W _{50%}	ELCL	LCL	UCL	EUCL
	[t]	p<2%	0% <p<10%< th=""><th>70%<p<100%< th=""><th>97%<p< th=""></p<></th></p<100%<></th></p<10%<>	70% <p<100%< th=""><th>97%<p< th=""></p<></th></p<100%<>	97% <p< th=""></p<>
PPR 1	2,25	0,05	0,28	4,50	9,00
PPR 2	0,87	0,02	0,11	1,74	3,48
PPR 3	1,15	0,02	0,14	2,30	4,60
PPR 4	1,8	0,04	0,23	3,60	7,20

Tablica F-4 Standardne granica široko graduirane granulometrijske krivulje primarnog sloja školjere po profilima

Prema pravilima za kakvoću granulometrijske krivulje školjere može se načiniti kontrola kvalitete postojeće školjere. Najprije je potrebno odrediti da li je postojeća školjera usko, široko ili vrlo široko graduirana. Za sve presjeke po sekcijama definirana je gornja i donja granica za široko graduiranu školjeru na osnovu očitanih vrijednosti W_{50%} iz granulometrijskih krivulja. Osnovni zahtjev je da se široko graduirana granulometrijska krivulja primarnog sloja školjere uklapa u projektirano područje granulacije omeđeno gornjom i donjom granicom koje su ucrtane u pojedine granulometrijske krivulje na slici F-3.

Za svaku se granulometrijsku krivulju očitaju mase blokova $W_{85\%}$, $W_{50\%}$, $W_{15\%}$, te se izračunaju nominalni promjeri blokova $D_{85\%}$, $D_{50\%}$, $D_{15\%}$ prema izrazu:

$$D_{X\%} = \left[\frac{6}{\pi} \cdot \left(\frac{W_X}{\rho_{kam}}\right)\right]^{\frac{1}{3}} = 1,24 \cdot \left(\frac{W_X}{\rho_{kam}}\right)^{\frac{1}{3}}.$$
 (F-2)

Potom se za svaku granulometrijsku krivulju očita parametar granulometrijske širine:

$$pg\check{s} = \frac{D_{85\%}}{D_{15\%}}.$$
 (F-3)

Kriteriji za odabir širine granulometrijske krivulje su:

-uska granulometrija:	pgš<1,5
-široka granulometrija:	1,5 <pgš<2,5< td=""></pgš<2,5<>
-vrlo široka granulometrija:	2,5 <pgš<5 (11)<="" td=""></pgš<5>

Rezultati analize širine granulometrijske krivulje su prikazani u tablici F-5.

	W _{85%}	W _{50%}	W _{15%}	D _{85%}	D _{50%}	D _{15%}	pgš=D _{85%} /D _{15%}	pgš<1,35	1,35 <pgš<2< th=""><th>pgš>2</th></pgš<2<>	pgš>2
	[t]	[t]	[t]	[m]	[m]	[m]	ugrađeno	usko	široko	vrlo šir.
PPR 1	6,1	2,25	0,63	1,65	1,18	0,77	2,13			X
PPR 2	1,7	0,87	0,31	1,08	0,86	0,61	1,76		х	
PPR 3	2,3	1,15	0,41	1,19	0,95	0,67	1,78		Х	
PPR 4	2,8	1,8	0,54	1,27	1,10	0,73	1,73		X	

Tablica F-5 Određivanje širine granulometrijske krivulje

Prema suvremenom pravilu struke ugrađena školjera mora biti usko graduirana. Iz razloga što je školjera u Kašama rađena u prošlosti i višekratno "zanatski" popunjavana ispitivanje je pokazalo da je ona široko graduirana.

Procjena poroziteta i zapremninske gustoće mase

Temeljem podataka iz formulara opažanja veličine kamenih blokova (tablica F-1), podataka iz granulometrijskih krivulja (slika F-3) te procjene tlocrtne površine (tablica F-6) pojedinih profila po sekcijama na osnovu poprečnih presjeka (slika F-4) definirana je tablica F-6 poroziteta p[%] i zapremninske gustoće mase γ_{kam}^{zapr} [t/m³] školjere.

	dužina sekcije [m]	širina sekcije [m]	površina sekcije A [m²]	
PPR 1	9,0	3,5	31,5	
PPR 2	11,3	3,5	39,55	
PPR 3	10,7	3,5	37,45	
PPR 4	10,9	3,5	38,15	

Tablica F-5 Tablica procjene dužina i izračuna površina pojedinih sekcija.



Slika F-4 Poprečni presjeci po profilima (gornji red PPR1 i PPR2, donji red PPR3 i PPR4)

Porozitet školjere određuje se izrazom :

$$p[\%] = 1 - \frac{N_r}{A \cdot n \cdot k_\Delta} \left(\frac{\rho_{kam}}{W_{50\%}}\right)^{\frac{2}{3}}$$
(F-4)

gdje je *p* [%] porozitet školjere, *A* [m² površina pokosa sekcije, *n*=1,5 broj blokova u ispitanom sloju školjere. Pošto se samo površinski sloj ugrađene školjere vidi i može se prebrojati tada se vrši redukcija ukupno prebrojanog broja blokova na broj blokova u jednom sloju školjere. Tako za samo jedan red blokova je n=1,0, a za dva reda blokova je n=2,0 (ukoliko je poznat N_r iz oba sloja). U slučaju lukobrana Kaše zbog široke granulacije školjere je izgled presjeka poput onog na slici F-5(sredina) te se uzima kompromisna vrijednost n=1,5. Nadalje k_{\perp} =1,1 je koeficijent sloja, ρ_{kam} =2,6[t/m³] gustoća mase kamena, W_{50%} [t] masa 50%-tnog bloka iz granulometrijske krivulje i N_r broj kamenih blokova izbrojen na površini temeljen na blokovima promjera >0,4m.



Slika F-5 Definicijska skica koeficijenta broja blokova u ispitivanom sloju školjere "n".

Prosječna zapremninska masa školjere, prema pravilu struke treba biti γ_{kam} =1,6±0,1 [t/m³], a određuje se prema izrazu:

$$\gamma_{kam}^{zapr} = \left(1 - \frac{p}{100}\right) \cdot \rho_{kam} \tag{F-5}$$

gdje je γ_{kam} ^{zapr} [t/m³] zapremninska masa školjere i ρ_{kam} [t/m³] gustoća mase kamena školjere.

Kako se mase kamenih blokova procjenjuju, i ne zna se ništa o podpovršinskom sloju školjere, ovi parametri nisu precizno određeni.

	propisano		masa 50% bloka iz granul. krivulje	broj kamenih blokova izbrojen na površini ≥ 0,4m	površina trake (sekcije)	izmje	ereno
	р	Y _{kam} ^{zapr} (bez uzgona)	W _{50%}	N _r	A	р	Y _{kam} ^{zapr} (bez uzgona)
	[%]	[t/m ³]	[t]	[kom]	[m²]	[%]	[t/m ³]
PPR 1	35-42	1,5-1,7	2,25	45	31,50	21%	2,0
PPR 2	35-42	1,5-1,7	0,87	71	39,55	48%	1,4
PPR 3	35-42	1,5-1,7	1,15	63	37,45	41%	1,5
PPR 4	35-42	1,5-1,7	1,8	59	38,15	27%	1,9

Tablica F-6 Tablica izračuna poroziteta p[%] i zapremninske gustoće mase $\gamma_{\rm kam}{}^{
m zapr}$ [t/m³] školjere

Procjena kakvoće ukliještenosti (stabilnosti) primarne obloge (površinskog sloja) školjere

Za široko graduiranu školjeru lukobrana Kaše na temelju procjene kakvoće ukliještenosti u nastavku je provedeno smanjenje koeficijenta stabilnosti postojeće školjere K_D u odnosu na propisani koeficijent. Da bi se izvela teorijska osnova za takvu analizu polazi se od pretpostavke da na školjeru djeluju valovi konstantne visine $(H_{proj}=H_{1/10}^{100god})$, a ukliještenost nekih blokova je dobra, a nekih nije. Masa stabilnog bloka školjere proračunava se prema Hudsonu (izraz 5-35).

Propisani koeficijent stabilnosti standardno ukliještene stabilne širokograduirane školjere $K_{D=0}$ definiran je tablicom F-7 i ne odnosi se na specijalno kvalitetan način postave nego na standardan "kamenomet". To znači slučajno slaganje pojedinačnih kamenih blokova dizalicom na pokos nagiba 1:1,5 ili blaži, od nožice prema kruni, bez njihovog posebnog namještanja i dirigiranja ronioca. Položeni blokovi se na prethodno postavljene, moraju oslanjati na minimum 3 točke. Ugrađeni blokovi ne smiju titrati pod valnim opterećenjem, ne smiju se držati samo trenjem; tj. moraju biti uklješteni i moraju formirati zaštitni sloj iznad ostalih slojeva lukobrana u vidu dva bloka po debljini sloja. Kod takve školjere K_D daje optimalnu veličinu kamenih blokova uz oštećenje od 0 do 5% kod projektnog 100-godišnjeg žestokog stanja mora, pa se takav koeficijent

stabilnosti širokograduirane školjere označava sa $K_{D=0}$. Oštećenje školjere definira se postotkom ispalih blokova s pokosa koji se otkotrljaju niz pokos do dna mora.

KAMENA ŠIROKOGRADUIRANA ŠKOLJERA	TRUP LUKOBRANA nagib pokosa 1:1,5 nelomljeni valovi
K _{D=0} "propisani" za potpuno uklještenu širokograduiranu školjeru cerc7-206	2,5
K _{D>0} za u potpunosti neuklještenu širokograduiranu školjeru (rač. po form.)	1,65
K _{D>>0} kod sloma lukobrana (filter na pokosu)	→0

Tablica F-7 Orijentacijske vrijednosti koeficijenta stabilnosti K_D širokograduirane školjere za konstantnu valnu visinu, za različite ukliještenosti

Analiza ovisnosti koeficijenta stabilnosti K_D neke ugrađene širokograduirane školjere počinje od pretpostavke da primarni (površinski) sloj na pokosu lukobrana ima 2 reda blokova i da se na pokosu ne vidi sitniji filterski materijal ili sasvim sitna jezgra. Tada koeficijent K_D može biti smanjen samo uslijed slabe uklještenosti. Da bi se mogla procjeniti stabilnost školjere hidrodinamički opterećene valovima, potrebno je procjeniti uklještenost pojedinog bloka školjere, odnosno njenog površinskog sloja. Procjena uklještenost vrši se na definiranim profilima procijenom broja kontakata bloka školjere sa susjednim blokovima istoga sloja (površinska ploha pokosa). Za svaki blok unutar ispitnog polja širine 3,5 m procjenjuje se koliko je susjednih blokova u kontaktu. Ne broje se kontakti bloka promjera manjeg od 0,4 m. Kontaktom se ne smatra dodir sa blokovima donjeg sloja. Broj kontakata po profilima dan je u tablici F-8.

Nadalje je prikazana teoretska osnova određivanja koef. K_D na osnovu procjenjenog broja kontakata.



Slika F-6 Skica sila na bloku dobro ukliještene obloge.

broj kontakata sa susjednim blokovima	broj blokova s određenim brojem kontakata	ukupno blokova
	PPR 1	
0		
1	+++++++	11
2	===	14
3	==	9
4	≡	5
5 i više		
prosječan broj l	kontakata Nk=	2,68
	PPR 2	
0		3
1	++++++++ -++++++++	20
2	++++++++ -+++++++++ 111111	26
3	++++++++ 11	12
4		8
5	II	2
prosječan broj l	2,71	
	PPR 3	
0		4
1	+++++++++ -11	12
2		16
3		19
4	==	9
5	III	3
prosječan broj l	kontakata Nk=	2,98
	PPR 4	
0		
1		11
2		18
3	++++++++ 11111	16
4	+++++++	12
5	I	2
prosječan broj l	2,96	

Tablica F-8 Formular opažanja broja blokova sa određenim brojem kontakata sa susjednim blokovima

Na slici F-6 prikazan je raspored sila koje djeluju na stabilnost bloka školjere. Nagib pokosa je jednak srednjem nagibu školjere lukobrana Kaše (α =23°). Sila F je

komponenta hidrodinamičke sile vala koja djeluje na čupanje bloka obloge i ugrožava mu stabilnost. Njoj se suprostavljaju vlastita težina G i trenje sa susjednim blokom T. Konzervativno, za slučaj uklještenog bloka, u račun se uzima doprinos na stabilnost samo gornjeg susjednog bloka. Za slučaj neuklještenosti taj doprinos se ne uzima i hidrodinamičkoj sili suprotstavljat će se samo vlastita težina bloka.

Analizom stabilnosti za kritičan slučaj kada hidrodinamičko opterećenje djeluje okomito na pokos i kada je moguće prevrtanje bloka oko točke A. Za slučaj uklještenosti slijedi

$$F_{D=0} = \frac{\rho g H_{proj}^3}{k_{D=0} \left(\frac{\rho^{kam}}{\rho^{mora}} - 1\right) \cdot ctg \alpha} (\cos \alpha + 2 f_t \sin \alpha), \tag{F-6}$$

A za slučaj neuklještenog bloka analiza stabilnosti daje izraz

$$F_{D>0} = \frac{\rho g H_{proj}^3}{k_{D=0} \left(\frac{\rho^{kam}}{\rho^{mora}} - 1\right) \cdot ctg \alpha} \cos \alpha .$$
(F-6)

Sile $F_{D=0}$ i $F_{D>0}$ su hidrodinamičke sile na blok obloge na pokosu nagiba 1:2,4 za slučaj uklještenog i neuklještenog stabilnog bloka, a f_t koeficijent trenja kamena o kamen ($f_t = 0,6$).

Ako na ukliješteni i neukliješteni istovrsni blok školjere djeluju isti valovi, oni izazivaju iste hidrodinamičke sile: $F_{D=0} = F_{D>0}$. Odatle slijedi da je za istu veličinu kamenog bloka vrijednost koeficijenta $K_{D=0}$ za uklještenu školjeru nagiba 1:2,4 za 1,51 puta veći nego li $K_{D>0}$ za neuklještenu školjeru; odnosno da bi neukliješteni blok morao biti oko 51% teži od ukliještenog da dostigne istu stabilnost kao ukliješteni blok.

Prema tablici F-7 slijedi da je $K_{D>0}$ za širokograduiranu neukliještenu školjeru na tijelu lukobrana kod nelomljenih valova: $K_{D>0} = 2,5/1,51=1,65$. Neukliješteni stabilni blok postići će se kod najmanje 2 kontakta razmatranog bloka na donjoj strani pokosa. Pretpostavlja se da je potpuna ukliještenost postignuta kad neki blok ima 5 i više kontakata s okolnim blokovima, i tada je postignut $K_{D=0}$ koji odgovara potpuno stabilnom bloku bez oštećenja. Prema tablici F-7 slijedi da je $K_{D=0}$ za širokograduiranu ukliještenu školjeru na tijelu lukobrana kod nelomljenih valova: $K_{D=0} = 2,5$. Blok na pokosu bez ijednog kontakta, a iste veličine kao i ukliješteni blok na tom pokosu, bit će nestabilan! Takav blok morao bi biti beskonačno teži od ukliještenog da dostigne istu, a njegov K_D morao bi težiti nuli; tj. $K_{D>0} \rightarrow 0$. Temeljem ovako definiranih relacija između koeficijenta stabilnosti K_D i broja kontakata sa susjednim blokovima načinjen je linearnom interpolacijom dijagram odnosa " K_D - broj kontakata", prikazan na slici F-7.



Slika F-7 Ovisnost koeficijenta stabilnosti K_D za širokograduiranu ukliještenu školjeru na tijelu lukobrana kod nelomljenih valova o broju kontakata sa susjednim blokovima.

U tablici F-8 prikazana su opažanja broja blokova sa određenim brojem kontakata sa susjednim blokovima. Na osnovu podataka o 2, 3, 4, i 5 i više brojeva kontakata izračuna se prosječan broj kontakata za svaki profil i pojedinu sekciju. Ne uračunavaju se u prosjek 0 i 1 kontakt jer se smatra da nisu stabilni na pokosu i ne doprinose bitno stabilnosti cjeline pokosa. Sa tako određenim brojem kontakata se pomoću grafa na slici F-7 odredi vrijednost koeficijenta K_D , za svaki pojedini profil, a što je prikazano u tablici F-9. K_D , prema tome, može biti jednak ili manji od "propisanog" u Tablici F-7.

	prosječan broj kontakata N	K _D	W _{50%} [t]
PPR 1	2,68	1,8	2,3
PPR 2	2,71	1,9	0,9
PPR 3	2,98	1,9	1,2
PPR 4	2,96	1,9	1,8
PROSJEK	2,73	1,9	1,6

Tablica F-9 Očitane vrijednosti koeficijenta K_D na osnovu procijenjenih prosječnih brojeva kontakata N i pripadne 50%-tne težine $W_{50\%}$ blokova školjere.

			IZMJERENO		
	K _D	W _{50%}	parametar	$\gamma_{\rm kam}^{\rm zapr}$	р
	[1]	[t]	granulometrijske širine	[t/m ³]	[%]
PPR 1	1,8	2,25	vrlo široko	2,0	21,4%
PPR 2	1,9	0,87	široko	1,4	47,6%
PPR 3	1,9	1,15	široko	1,5	40,8%
PPR 4	1,9	1,80	široko	1,9	26,6%

Konačno u tablici F-10 dan je prikaz granulometrijskih značajki školjere lukobrana Kaše.

Tablica F-10 Prikaz granulometrijskih značajki školjere lukobrana Kaše.

Matematički model valnih deformacija ispred lukobrana Kaše

Za potrebe definiranja dubokovodne valne klime uz pretpostavku poznavanja plitkovodne valne klime provedena je dvodimenzionalna analiza deformacija pučinskih valova iz smjera SE (uključuje i valove smjerova ESE i SE) i iz smjera SW (uključuje i valove smjerova SSW i WSW) do plitkog mora gdje se nalazi lukobran Kaše uz pomoć matematičkog modela valovanja MIKE 21/BW.

Naime za ranije pretpostavljenu dubokovodnu valnu klimu provedena je analiza deformacija iz područja dubokog mora do područja neposredno ispred lukobrana te je na taj način definiran koef. valnih deformacija koji je korišten u nastavku.

Na slici F-8 prikazana je batimetrija promatranog područja.

Karakteristikama obale na promatranom podrucju pridruženi su odgovarajući koeficijenti refleksije prikazani na slici F-9. Koeficijenti refleksije su procijenjeni tako da je na obali u obliku vertikalnog zida odabran $k_r = 0.8$, na području prirodne kamene obloge $k_r = 0.5$ i na području plaže blagog nagiba $k_r = 0.2$.

Deformacije valova analizirane su po smjerovima grafički i numerički preko zamišljenih profila Profila 1 i Profila 2 (slika F-10) na čijem je početku kontrolna točka u dubokom P_1 , a na kraju je kontrolna točka P_5 , u plitkom u gradskoj luci. Za definiranje dubokovodne valne plime mjerodavna je kontrolna točka P_4 neposredno ispred lukobrana.

U tablici F-11 prikazani su modelom dobiveni koeficijenti valnih deformacija dubokovodnih valova iz promatranih smjerova.

	Smjer SE	Smjer SW
koeficijent deformacije	0,23	0,26
Tablian E 11 Kaofinianti deformaniin na aminrovima		

Tablica F-11 Koeficijenti deformacije po smjerovima



Slika F-8 Batimetrija Lokrumskog prolaza i gradske luke Dubrovnik



Slika F-9 Vrijednosti koeficijenata refleksije za pojedine djelove obale



Slika F-10 Prikaz profila i točaka očitanja vrijednosti deformirane valne visine iz matematičkog modela za promatrane smjerove

Definiranje valne visine "preživljavanja" lukobrana Kaše

Na temelju provedenih ispitivanja školjere i proračuna deformacija valova definirana je po Hudsonovoj formuli značajna valna visina koja odgovara dimenzijama primarne obloge lukobrana Kaše.

Srednja vrijednost mase bloka 50%-tne zastupljenosti prema četiri analizirana presjeka iznosi oko 1,6t, a koeficijent obloge koji odgovara srednjoj uklještenosti 1,9. Na temelju tako dobivenih parametara, Hudsonovom formulom definirana je pripadna valna visina koja ne bi trebala ugroziti stabilnost lukobrana:

$$H_{\frac{1}{10}} = \sqrt[3]{\frac{W_{50\%}K_D(S_r - 1)^3 ctg\alpha}{\gamma_r}} = \sqrt[3]{\frac{1600 \cdot 1,9 \cdot \left(\frac{2650}{1050} - 1\right)^3 ctg23}{2650}} = 2,12m$$
(F-7)

odnosno

$$H_s = \frac{H_{\frac{1}{10}}}{1.27} = 1,67m.$$
(F-8)

Zatim je ovako dobivena značajna valna visina u plitkom području ranije definiranim koeficijentom transformirana u dubokovodno područje a rezultati su prikazani u tablici F-12.

	Smjer SE	Smjer SW
Hs [m]	7,26	6,42
	* • • • • • • • •	

Tablica F-12 Dubokovodne značajne valne visine koje po Hudsonovoj formuli ne utječu na stabilnost lukobrana po smjerovima

U tablici F-12 prikazanim valnim visinama pridruženo je, prema rezultatima prikazanim u poglavlju 4, povratno razdoblje odgovarajuće značajne valne visine 20 i 100 godina.