

## 1. Uvod

Cilj ove vježbe je uspostava i baždarenje numeričkog modela valnog generiranja za šire područje Riječkog zaljeva temeljem rezultata mjerenja na valografskoj postaji. U sklopu baždarenja (parametrizacija) modela prvotno se provodi analiza osjetljivosti modelskih konstanti te se nakon toga varijacijom „najsenzibilnije“ modelske konstante određuje i njezina odgovarajuća vrijednost.

U sklopu ovog primjera korišten je sljedeći izvor relevantnih podataka o intenzitetu i vjerojatnosti pojavljivanja vjetrova po analiziranim smjerovima: „*Hidraulička analiza valova i nasipnih konstrukcija sjeverne obale brodogradilišta 3. Maj u Rijeci*“, Građevinski institut, Zagreb, 1991.

U navedenom radu su za potrebe dimenzioniranja obloge obalnog zida za tzv. sjevernu obalu brodogradilišta 3. Maj u Rijeci analizirana vjetrovalna obilježja predmetnog akvatorija. Analize su temeljene na podacima praćenja vjetrova tijekom razdoblja 1957-1980 od strane Republičkog hidrometeorološkog zavoda SR Hrvatske, a koji su predočeni u Meteorološkom izvještaju za projektiranje lukobrana marine Ičići. Osim toga, prikazani su i rezultati mjerenja valova tijekom 1974. i 1975. godine sa instrumentima postavljenim na lukobran Petar Drapšin u luci Rijeka.

## 2. Analiza podataka o vjetrovnim obilježjima

Predmetna lokcija brodogradilišta 3. Maj u Rijeci izložena je primarno valovima drugog i trećeg kvadranta (posebice SE i SSE smjera).

U tablici 2.1 prikazan je broj pojavljivanja najjačih jakih i olujnih južnih vjetrova po godinama opažanja u razdoblju 1957.-1980. za meteorološku postaju Rijeka [1].

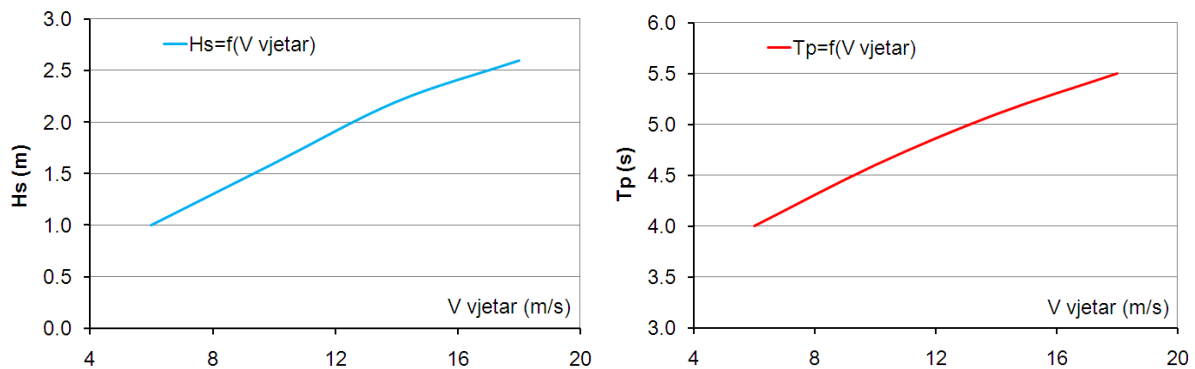
**Tablica 2.1 Broj pojavljivamnja najjačih jakih i olujnih južnih vjetrova po godinama opažanja u razdoblju 1957.-1980. za meteorološku postaju Rijeka [1]**

	SE-SSE	S		SE-SSE	S		SE-SSE	S
1957	7 bf 5X		1965	8 bf 2X		1973	7 bf 4X	
1958	7 bf 8X		1966	8 bf 1X	7 bf 1X	1974	7 bf 1X	7 bf 1X
1959	8 bf 1X		1967	7 bf 4X	7 bf 2X	1975	8 bf 1X	
1960	8 bf 1X		1968	8 bf 1X	7 bf 1X	1976	10 bf 1X	
1961	7 bf 1X	7 bf 1X	1969	8 bf 2X		1977	9 bf 2X	
1962	8 bf 1X		1970	7 bf 3X		1978	7 bf 1X	9 bf 1X
1963	7 bf 7X	8 bf 1X	1971	7 bf 3X		1979	8 bf 2X	7 bf 1X
1964	9 bf 1X	7 bf 1X	1972	8 bf 1X	7 bf 1X	1980	8 bf 1X	

Pregledom vrijednosti brzina vjetra za smjerove SE-SSE i S, prikazanih u tablici 2.1, zaključuje se da najjači vjetrovi nastupaju iz smjera SE-SSE te da imaju smjera veću učestalost pojavljivanja. Obzirom da su duljine privjetrišta za analiziranu lokaciju slična, za SE-SSE i S smjer djelovanja vjatra, numeričke analize provode se samo za SE-SSE smjer (nepovoljniji slučaj – očekivane veće valne visine ispred brodogradilišta 3. Maj u Rijeci).

### 3. Analiza podataka o valnim obilježjima

Pri uspostavi numeričkog modela (baždarenje modela) korišteni su podaci mjerenja valnih parametara (slika 3.1) na poziciji lukobrana Petar Drapšin u luci Rijeka. Na slici 3.1 prikazan je odnos izmjerenih značajnih valnih visina  $H_S$  i vršnih perioda  $T_p$  o izmjerenim brzinama vjetra  $V_{vjetar}$ , pri djelovanju vjetra iz SSE smjera sa trajanjem 12 sati [1]. Pozicija valografa (long - 14,4223 ; lat - 45,3266) naznačena je na slici 4.1.



Slika 3.1 Odnos izmjerenih značajnih valnih visina  $H_S$  i vršnih perioda  $T_p$  o izmjerenim brzinama vjetra  $V_{vjetar}$  pri djelovanju vjetra iz SSE smjera sa trajanjem 12 sati [1]

Rezultati mjerenja sa slike 3.1 služe kao osnov za baždarnu proceduru pri uspostavi numeričkog modela valnog generiranja.

### 4. Uspostava numeričkog modela i pristup modeliranju

Na slici 4.1 prikazano je područje obuhvaćeno s prostornom domenom numeričkog modela valnog generiranja. Na slici je prikazana i primijenjena modelska diskretizacija s konačnim volumenima. Prostorna raspodjela dubina (batimetrija), kao bitna podloga, definirana je podacima na rasteru s korakom 7,5' u long/lat sustavu. Udaljenost između numeričkih čvorova, smještenih u težište površine svakog konačnog volumena, je varijabilna i proteže se od 650 m u dubokovodnom području do 150 m u zoni same obalne crte.

Za provedbu numeričkih analiza korišten je numerički model MIKE 21/SW koji omogućuje simulaciju generiranja, deformacija i zamiranja gravitacijskih vjetrovnih valova i valova mrtvog mora u području otvorenog mora i priobalja. Korištena je puna spektralna formulacija pri čemu je direkcijski valni spektar zavisna varijabla. Modelskom implementacijom moguće je obuhvatiti procese valnog generiranja s vjetrom, međusobnih valnih nelinearnih interakcija, refrakcije, difrakcije i utjecaja plićine te disipacijski procesi izazvani trenjem s dnom, površinskim lomovima valova (eng: white capping) i lomovima valova pri nailasku na male dubine.

Svaki od navedenih utjecaja moguće je uključiti ili isključiti iz modelskog proračuna. Ukoliko je pojedini proces uključen, potrebno je definirati i odgovarajuću modelsku konstantu.

Na raspolaganju su sljedeće konstante kojima se definira pojedini utjecaj:

- a) Utjecaj interakcije mora i atmosfere (DA ili NE)
- b) Koeficijent Gamma - utjecaj loma valova uslijed plićine
- c) Nikuradse koeficijent – utjecaj hrapavosti dna
- d) Koeficijenti Cdis i DELTAdis – utjecaj disipacije energije vala pri površinskom lomu valova

Određivanje važnosti pojedinog utjecaja, a time i senzibilnost pripadnog modelskog parametra, ostvaruje se na sljedeći način:

- 1.) Odabire se jedan utjecaj i njegova odgovarajuća konstanta. Varira se vrijednost te konstante, uz zanemarenje preostalih utjecaja (vrijednosti preostalih modelskih konstanti su nule). Prvo se analizira utjecaj interakcije mora i atmosfere na način da provedu simulacije sa i bez interakcije. Nakon provedbe numeričkih proračuna registriraju se modelski rezultati značajnih valnih visina  $H_s$  i vršnih spektralnih perioda  $T_p$  za referentnu točku koja odgovara poziciji valografa (ispred lukobrana Petar Drapšin).
- 2.) Uspoređuju se rezultati za dva analizirana slučaja te se prepoznaje „važnost“ ili „nevažnost“ interakcije mora i atmosfere.
- 3.) Nakon toga se u modelsku analizu uključuje i utjecaj loma valova uslijed plićine sa izborom vrijednosti koeficijenta Gamma = 0,8 (literaturno preporučena vrijednost). Pritom je zadržana interakcijska veza mora i atmosfere. Slijedi proračun i registriranje modelskih rezultata.
- 4.) Uspoređuju se rezultati za slučajeve sa i bez utjecaja loma uslijed plićine, te se prepoznaje „važnost“ ili „nevažnost“ tog utjecaja.
- 5.) Za analizu utjecaja hrapavosti dna provodi se procedura slična navedenoj pod točkama 5 i 6. Pritom se usvaja vrijednost Nikuradseovog koeficijenta 0,04, te vrijednosti koeficijent Gamma = 0,8 i Charnock parametra = 0,04.

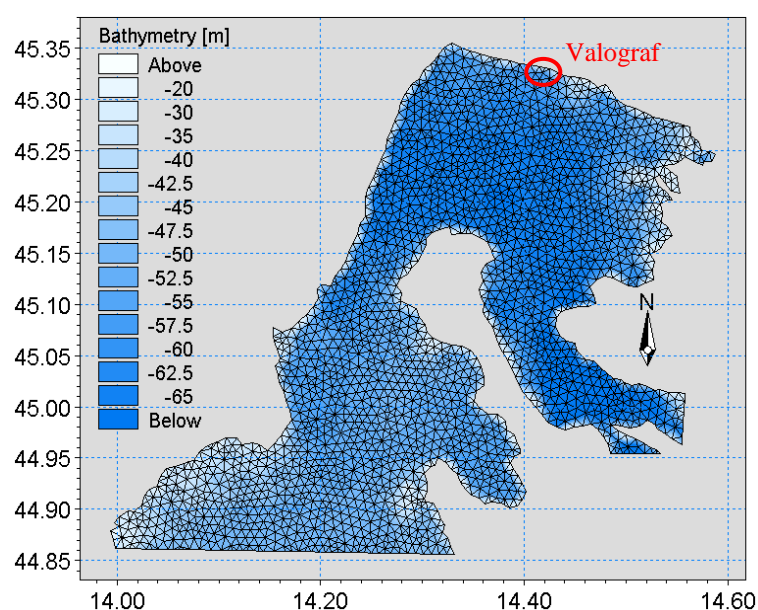
- 6.) Na kraju se analizira i utjecaj površinskih lomova valova. U modelskim proračunima varira se samo koeficijent  $C_{dis}$  s vrijednostima = 1 ; 2,5 ; 4,5. Vrijednost 4,5 je literaturno referencirana no više za područja otvorenog mora nego za akvatorije ograničenih privjetrišta. U ovom zadnjem setu modelskih simulacija korištene su sljedeće fiksirane vrijednosti ostalih konstanti: Nikuradseov koeficijent 0,01m ; koeficijent Gamma = 0,8 ; Charnock parametar = 0,01.
- 7.) Uspoređuju se modelski rezultati za analizirane slučajeve  $C_{dis}$  = 1 ; 2,5 ; 4,5 te se prepoznaje „važnost“ ili „nevažnost“ izbora te konstante i utjecaja površinskog loma valova.

U modelskim simulacijama pod prethodno navedenim točkama 1-7 koristi se homogeno i stacionarno polje vjetra s brzinom 14 m/s i smjerom SSE ( $157^{\circ}$ ) na 10m od površine mora.

Sumarni pregled potrebnih modelskih simulacija s odgovarajućim koeficijentima (utjecajima) za analizu osjetljivosti dan je u tablici 4.1.

**Tablica 4.1 Sumarni pregled potrebnih modelskih simulacija s odgovarajućim koeficijentima (utjecajima) za analizu osjetljivosti dan je u tablici 4.1.**

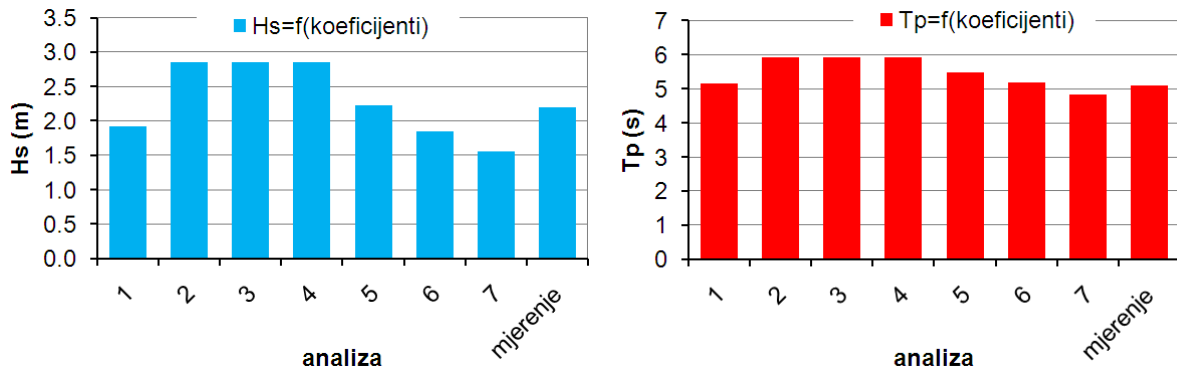
analiza	Charnock	Gamma	Nikuradse	$C_{dis}$
1				
2	0.01			
3	0.01	0.8		
4	0.01	0.8	0.04	
5	0.01	0.8	0.04	1
6	0.01	0.8	0.04	2.5
7	0.01	0.8	0.04	4.5



**Slika 4.1 Prostorna diskretizacija modelske domene s nestrukturiranom mrežom konačnih volumena na batimetrijskoj podlozi**

## 5. Rezultati modelskih simulacija za analizu osjetljivosti

Na slici 5.1 prikazane su modelske vrijednosti značajnih valnih visina  $H_S$  i vršnih perioda  $T_P$  za poziciju valografa prema provedenom skupu analiza iz tablice 4.1.



Slika 5.1 Modelske i izmjerene vrijednosti značajnih valnih visina  $H_S$  i vršnih perioda  $T_P$  za poziciju valografa prema provedenom skupu analiza iz tablice 4.1.

Rezultati analiza 2, 3 i 4 ukazuju na minorni utjecaj loma valova uslijed plićine (nesenzibilan koeficijent  $\Gamma$ ) i utjecaj hrapavosti dna (nesenzibilan Nikuradse koeficijent). Analizirano područje je „dubokovodno“, čak i u samom priobalju, pa čestice tekućine u svom gibanju induciranom valovanjem ne „osjećaju“ dno i nema lomova valova uslijed plićine. Stoga se rezultati pokazuju kao logični.

Interakcija mora i atmosfere pokazala se kao bitna (analize 1 i 2). U slučaju odsustva interakcije mora i atmosfere model daje manje vrijednosti  $H_S$  od izmjerenih, te nema daljnjih mogućnosti za njihovo uvećanje. Stoga je nužno uzeti u obzir spomenutu interakciju. Nadalje, uzimanjem u obzir interakcije mora i atmosfere dobivaju se veće vrijednosti  $H_S$  i  $T_P$  od izmjerenih. U tom slučaju potrebno smanjenje modelskih vrijednosti  $H_S$  i  $T_P$  može se ostvariti kroz obuhvat utjecaja površinskog loma valova koji se parametrizira koeficijentom  $C_{dis}$  (analize 5, 6 i 7). Tako primjerice modelska vrijednost  $H_S$  proračunata u analizi 5, s koeficijentom  $C_{dis}=1$ , odgovara izmjerenoj vrijednosti  $H_S$ . S druge strane, modelska vrijednost  $T_P$  u analizi 5 premašuje izmjerenu, dok je u analizi 6 vrlo bliska izmjerenoj.

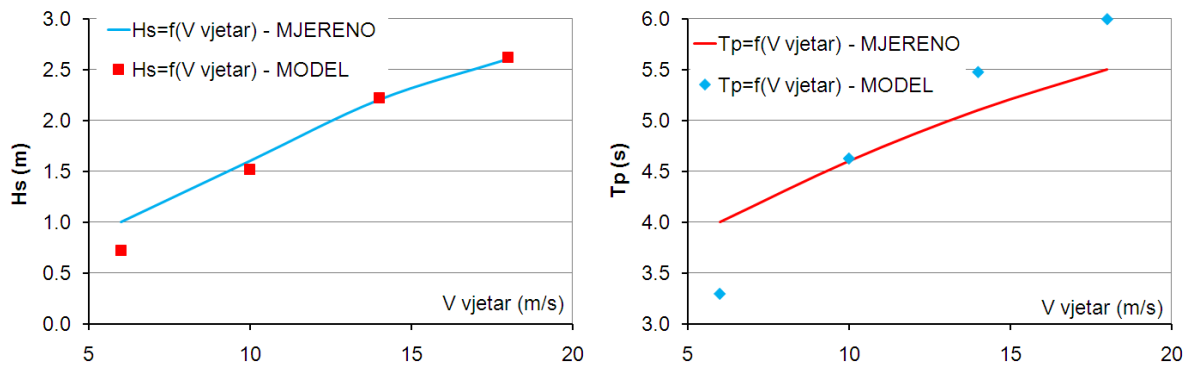
Koeficijent  $C_{dis}$ , sa kojim se parametrizira utjecaj disipacije energije vala pri površinskom lomu vala, pokazao se kao senzibilan (analize 4, 5, 6 i 7). Stoga se u nastavku baždarne procedure treba fokusirati na varijaciju vrijednosti upravo tog parametra, u cilju postizanja što većeg stupnja sličnosti sa izmjerenim valnim visinama i periodama.

## 6. Baždarne modelske simulacije s varijacijom najsenzibilnije konstante

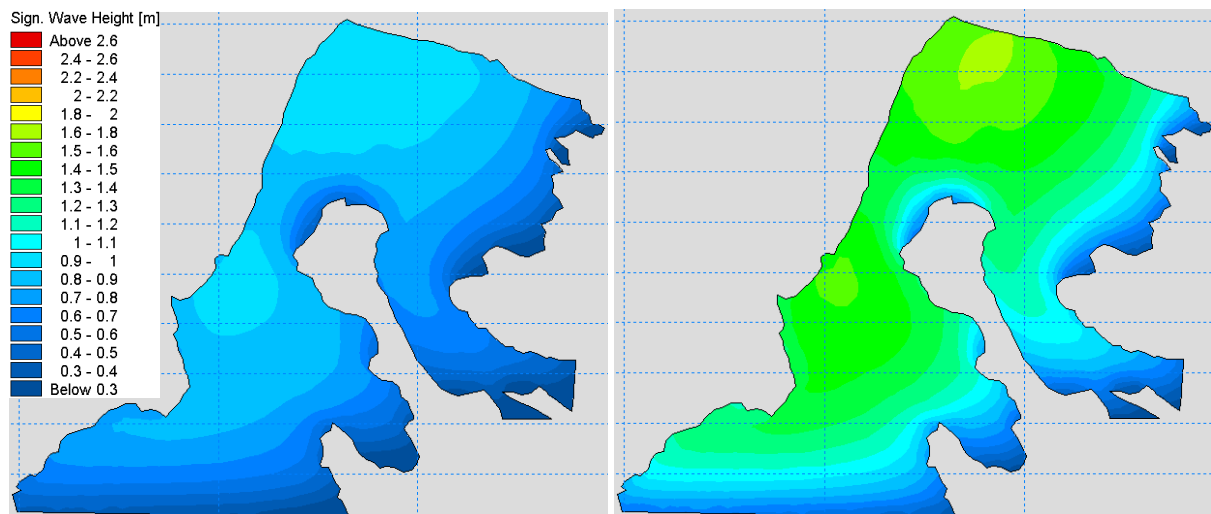
Na raspolaganju su podaci o odnosu značajnih valnih visina i vršnih perioda o brzini vjetra SSE smjera (slika 3.1) za poziciju korištenog monitoring valografa (lukobrana Petar Drapšin u luci Rijeka). Slijed nastavka baždarenja modela je takav da se u modelskim simulacijama varira vrijednost parametra  $C_{dis}$  pri djelovanju homogenom polju vjetra SSE smjera s brzinama 6, 10, 14 i 20 m/s.

Na slici 6.1 prikazana je usporedba modeliranih i izmjerenih vrijednosti  $H_S$  i  $T_P$  za poziciju mjerenja (lukobran Petar Drapšin u luci Rijeka). Na slici 6.1 naznačene su i usvojene vrijednosti koeficijenta  $C_{dis}$  sa kojima su dobiveni prikazani rezultati  $H_S$  i  $T_P$ .

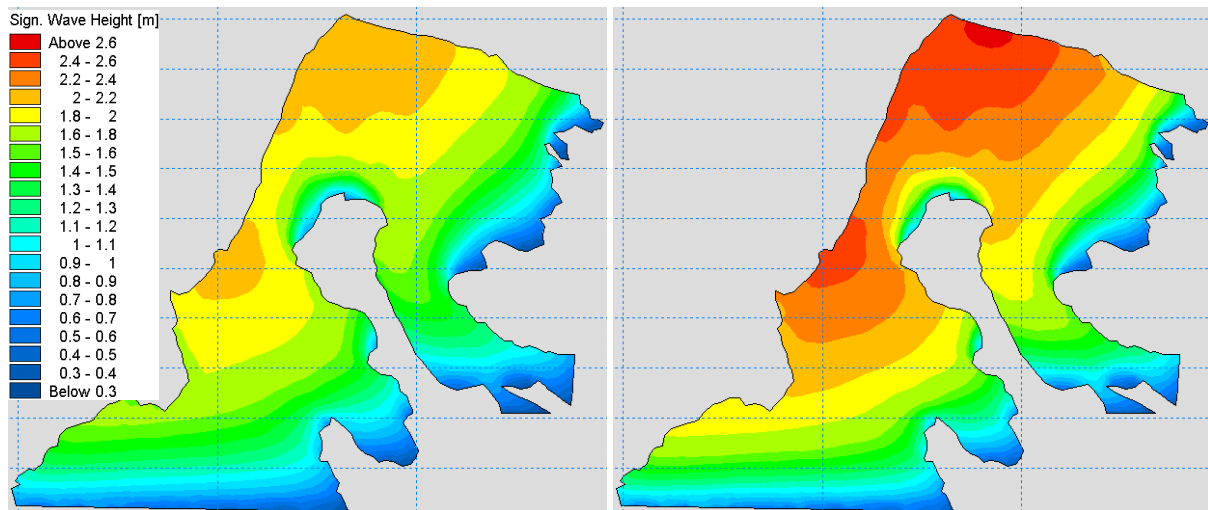
Na slikama 6.2 i 6.3 prikazana su modelska polja značajnih valnih visina  $H_S$  na modeliranom području, pri djelovanju vjetra SSE smjera sa intenzitetima 6, 10, 14 i 20 m/s.



Slika 6.1 Usporedba modelirane i izmjerene ovisnosti značajnih valnih visina  $H_S$  i vršnih spektralnih perioda  $T_P$  o brzini djelovanja vjetra SSE smjera za poziciju mjerenja (lukobran Petar Drapšin u luci Rijeka)



Slika 6.2 Modelska polja značajnih valnih visina  $H_S$  pri djelovanju vjetra SSE smjera sa intenzitetom 6m/s (lijevo) i 10m/s (desno).



**Slika 6.3** Modelska polja značajnih valnih visina  $H_s$  pri djelovanju vjetra SSE smjera sa intenzitetom 14m/s (lijevo) i 20m/s (desno).

Iz provedenih analiza može se zaključiti da je koeficijent  $C_{dis}$  u funkciji brzine vjetra, te da raste sa povećanjem brzine vjetra. U slučaju djelovanja vjetra s brzinama 6m/s i 10m/s vrijednost koeficijenta  $C_{dis}$  je 0, odnosno utjecaj površinskih lomova valova je zanemariv. Takvo stanje odgovara realnosti, budući se površinski lomovi valova pojavljuju tek kod većih valova koji su uzrokovani djelovanjem jačih vjetrova.

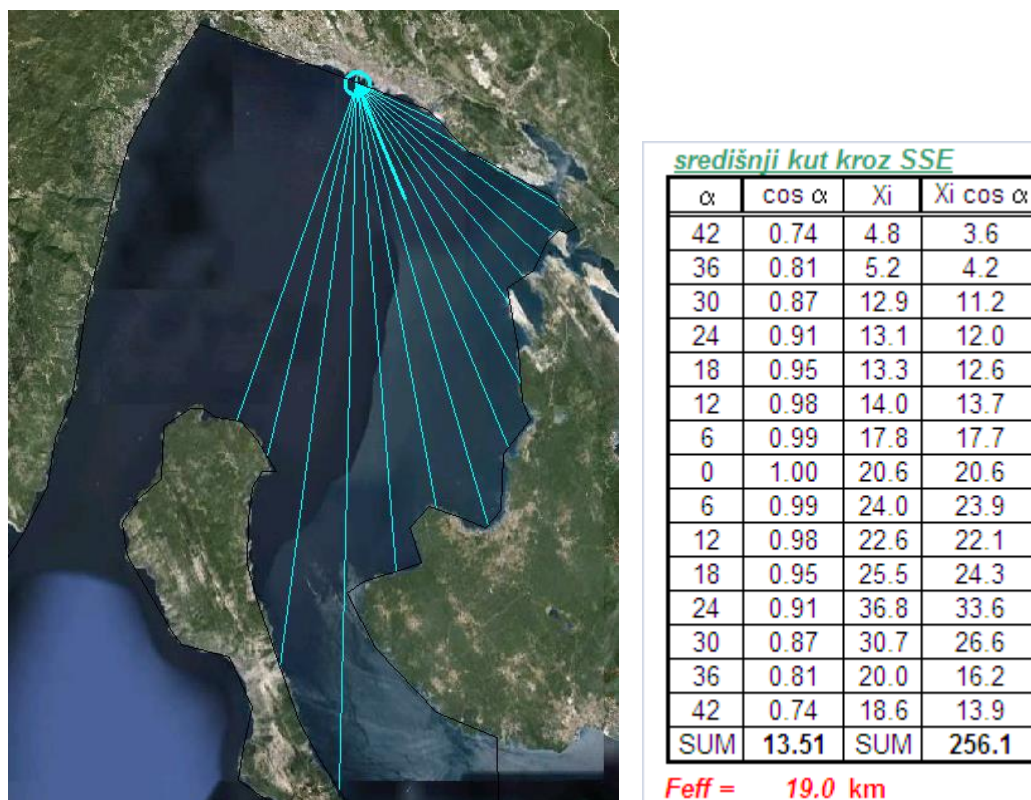
Postizanje sličnosti između modelskih i izmjerenih vrijednosti  $H_s$  međutim ne povlači za sobom i sličnost modelskih i izmjerenih rezultata  $T_p$ . Prema rezultatima prikazanim na slici 6.1, uočava se da modelski vršni spektralni periodi  $T_p$  ostvaruju brži prirast s povećanjem brzine vjetra nego što je to slučaj s izmjerenim vrijednostima  $T_p$ . Ovaj dio spektralne valne fenomenologije se neće dodatno analizirati, iako sam model sadrži elemente s kojima je moguće provesti daljnji tretman i adaptaciju vršnih spektralnih perioda.

U nastavku je provedena i semi-empirička analiza značajnih valnih visina temeljem Groen-Dorrensein metodologije. Provjera je provedena za situacije djelovanja vjetra SSE smjera. Prvo su proračunate efektivne duljine privjetrišta za smjer SSE. Proračun je proveden na način da se u svakom od odabranih smjerova postavi centralna zraka koja kao ishodište ima točku ispred lukobrana Petar Drapšin. Nakon toga se sa rotacijom od  $6^\circ$  u smjeru kazaljke na satu (do  $+42^\circ$ ) i suprotno od kazaljke na satu (do  $-42^\circ$ ) postavljaju pravci kroz istu ishodišnu točku. Određuju se duljine svake zrake od ishodišta do prve točke obale te se proračunava suma njihovih projekcija na centralnu zraku. Ta suma se dijeli sa sumom sinusa kuteva centralne zrake i ostalih rotiranih zraka a čime se dobiva i vrijednost duljine efektivnog privjetrišta.

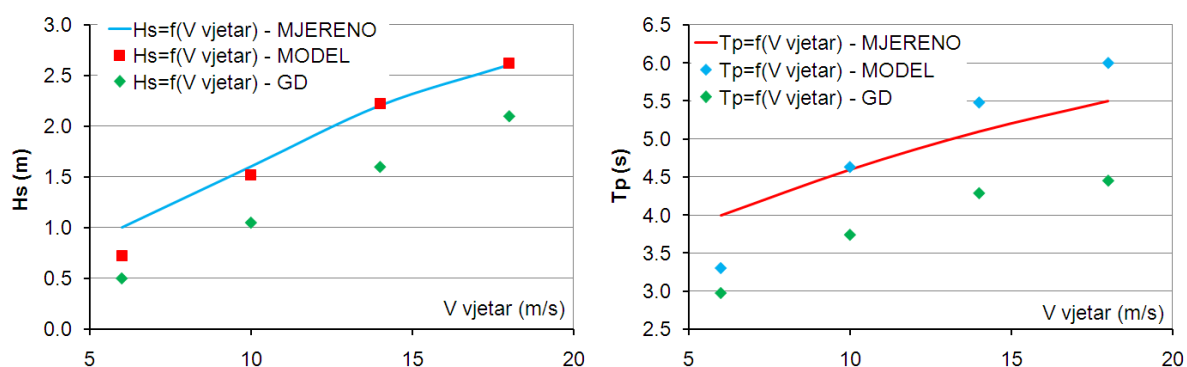
Na slici 6.4 dan je grafički prikaz postavljanja centralne zrake kroz smjer SSE te zrake sa korakom rotacije  $\pm 6^\circ$  od centralne zrake. Proračunske vrijednosti spomenutog postupka za

određivanje efektivne duljine privjetrišta također su dane na slici 6.4. Usvojena efektivna dužina privjetrišta za SSE smjer je 19 km.

Na slici 6.5 prikazana je usporedba  $H_S$  i  $T_P$  za referentnu točku prema rezultatima mjerenja, numeričkog modeliranja i Groen – Dorrenstein metodologije.



Slika 6.4 Centralne zrake kroz smjer SSE i zrake sa korakom rotacije  $\pm 6^\circ$  od centralne zrake (lijevo) i proračunske vrijednosti spomenutog postupka za određivanje efektivne duljine privjetrišta za središnji smjer SSE (desno)



Slika 6.5 Usporedba  $H_S$  i  $T_P$  za referentnu točku prema rezultatima mjerenja, modelskih analiza i Groen – Dorrenstein metodologije

Vrijednosti  $H_S$  proračunate Groen – Dorrenstein metodologijom manje su od izmjerenih za prosječno 29%. Vršni spektralni periodi  $T_P$  proračunati Groen – Dorrenstein metodologijom daju manje vrijednosti od izmjerenih za prosječno 20%.



## 7. Korišteni numerički model

Numerički model MIKE 21/SW ([www.dhigroup.com](http://www.dhigroup.com)) 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 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. Valno djelovanje  $N$  definirano je omjerom gustoće energije valnog spektra  $E$  i kutne frekvencije  $\omega$ . Ova formulacija je u proračunskom smislu manje vremenski zahtjevna i primarno se primjenjuje na manjim prostornim domenama s značajnije ograničenim privjetrištima do 50 km. Ukoliko se želi analizirati valno generiranje 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-a i Young-a u kojima je direkcijski valni spektar zavisna varijabla. Ova formulacija zahtjeva višestruko dulje proračunsko vrijeme, no daje i rezultate većeg stupnja točnosti, posebice na velikim prostornim domenama. Ukoliko se koristi direkcijska nevezana parametarska formulacija model daje mogućnost izbora jednadžbe za vjetrovalno generiranje, prema Shore Protection Manual iz 1984. godine ili prema radu Kahma i Calkoen-a iz 1994. godine.

U punom obimu, modelom se mogu modelirati procesi valnog generiranja s vjetrom, međusobnih valnih nelinearnih interakcija, refrakcije i utjecaja plićine, interakcije valova i strujanja, promjene morskih razi uslijed plimnih oscilacija te disipacijski procesi izazvani trenjem sa dnom, površinskim lomovima valova (eng: white capping) i lomovima valova pri nailasku na male dubine. Refleksija i difrakcija ne mogu se tretirati ovim modelom u verziji iz 2007. godine.

Diskretizacija osnovnih jednadžbi modela je bazirana na metodi konačnih volumena s kojima se dobiva nestrukturirana mreža u horizontalnoj ravnini modelske prostorne domene. Vremenska integracija provodi se s frakcionalnim koracima, pri čemu je za propagaciju valnog djelovanja korištena multisekvencijalna Euler-ova eksplicitna metoda. Član-funkcija izvora u jednadžbi očuvanja valnog djelovanja tretiran je na temelju posljednje 3. generacije u formulaciji opisa tog člana, a numerička integracija za član izvora provodi se prema metodologiji prikazanoj u radovima Komen-a te Hercbach-a i Jannsen-a. Konvektivni fluksevi proračunavaju se „upwind“ numeričkom shemom prvog reda.