

Prof. dr. sc. Marko Pršić, dipl. ing. građ.

PLOVNI PUTEVI I LUKE

Dio 3 REALNI MORSKI VALOVI

23.04.2011.

Sadržaj

3	REALNI VALOVI.....	4
3.1	REALNI POVRŠINSKI MORSKI VALOVI	4
3.1.1	VJETROVNI MORSKI VALOVI.....	4
3.1.1.1	Nastajanje vjetrovnih valova	5
3.1.1.1.1	Vjetar.....	5
3.1.1.1.2	Vjetrovi na Jadranu	12
3.1.1.1.3	Generativni procesi vjetrovnih valova.....	13
3.1.1.2	Spektralni opis valova kratkih perioda od vjetra	19
3.1.1.2.1	Definicija valnog spektra	19
3.1.1.3	Značajke valova živog mora.....	27
3.1.1.4	Značajke valova mrtvog mora	29
3.1.1.5	Statističko-vjerojatnosni opis vjetrovnih valova	31
3.1.1.6	Prognoze realnih valova	34
3.1.1.6.1	Prognoze površinskih vjetrovnih morskih valova.....	35
3.1.1.6.1.1	Podaci potrebni za prognoze vjetrovnih valova	37
3.1.1.6.2	Lokalne kratkoročne prognoze vjetrovnih valova	40
3.1.1.6.2.1	Lokalne kratkoročne prognoze reprezentativnih parametara valnog profila iz podataka o vjetru.....	41
Formulacija problema		46
3.1.1.6.2.2	Lokalne kratkoročne prognoze reprezentativnih parametara valnog profila iz podataka o valovima; t.j. obrada vizualnog opažanja ili valnog zapisa	50
3.1.1.6.2.2.1	Lokalne kratkoročne prognoze reprezentativnih parametara valnog profila iz vizualnog opažanja valova.....	51
3.1.1.6.2.2.2	Lokalne kratkoročne prognoze reprezentativnih parametara valnog profila iz instrumentalnih registracija valova.....	51
3.1.1.6.2.2.3	Lokalne kratkoročne prognoze valnih spektara iz podataka o valovima ili vjetru	52
3.1.1.6.2.2.3.1	Određivanje empirijskog spektra iz valnog zapisa	52
3.1.1.6.2.2.3.2	Prognoziranje spektra iz podataka o vjetru ili valovima	53
3.1.1.6.2.3	Regionalne kratkoročne prognoze vjetrovnih valova	57

3.1.1.6.3	Lokalne dugoročne statističko-vjerojatnosne prognoze vjetrovnih valova	65
3.1.1.7	Projektni valovi	78
3.1.1.8	DEFORMACIJE REALNIH VALOVA	Error! Bookmark not defined.
3.1.1.8.*	Propuštanje ili transmisija valova	Error! Bookmark not defined.
3.1.1.9	VALNO OPTEREĆENJE FIKSNIH POMORSKIH KONSTRUKCIJA ZA REALNE VALOVE	Error! Bookmark not defined.
3.1.1.9.1	Sila tlaka realnog vala	Error! Bookmark not defined.
3.1.1.9.1.1	Sila tlaka totalno reflektiranog realnog vala – Sainfluova formula	Error! Bookmark not defined.
3.1.1.8.1.2	Sila tlaka parcijalno reflektiranog realnog vala	Error! Bookmark not defined.
3.1.1.9.1.3	Sila tlaka lomljenog realnog vala	Error! Bookmark not defined.
3.1.1.9.1.4	Komparacija sila tlaka lomljenog vala po raznim teorijama ...	Error! Bookmark not defined.
3.2	REALNI MORSKI VALOVI DUGIH PERIODA	86

3 REALNI VALOVI

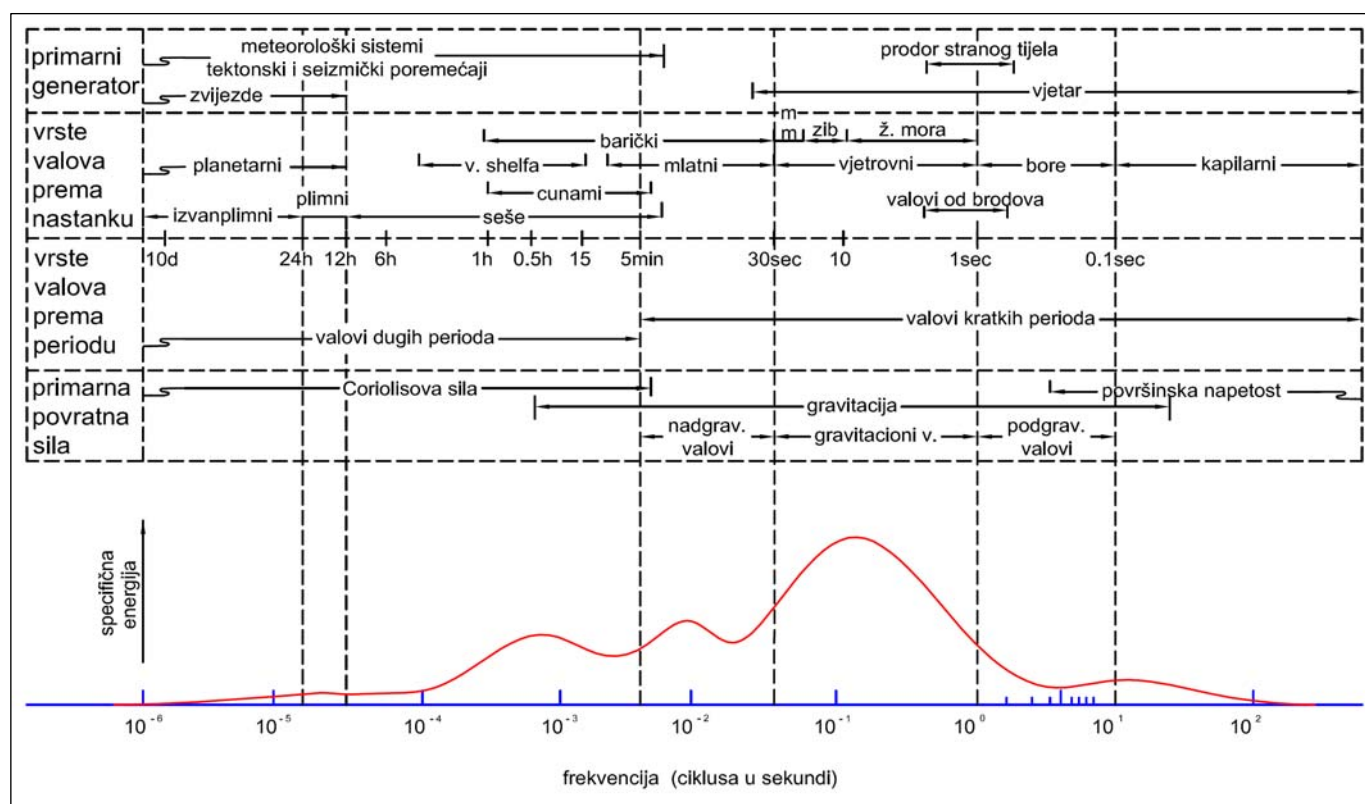
Realni valovi su valovi koji se javljaju u prirodi, a karakteristika im je da su bitno manje regularni od idealnih. Valna visina, period i smjer rasprostiranja su slučajne varijable.

Metode za opis realnih valova su statističko-vjerojatnosna i spektralna. Mogu biti površinski i unutarnji. Ovdje će se dalje analizirati samo površinski.

3.1 REALNI POVRŠINSKI MORSKI VALOVI

3.1.1 VJETROVNI MORSKI VALOVI

Na slici 3.1.1.1.3::1 je prikazana klasifikacija površinskih morskih valova prema primarnom generatoru i primarnoj umirujućoj (povratnoj) sili, gdje se vidi da su vjetrovni valovi valovi najveće energije, i proizvode najveća djelovanja na konstrukcije. Također zbog svoje učestalosti zahtijevaju da im se obrati najviše pažnje kod dimenzioniranja pomorskih konstrukcija. Pripadaju u grupu progresivnih, oscilatornih valova kratkih perioda.



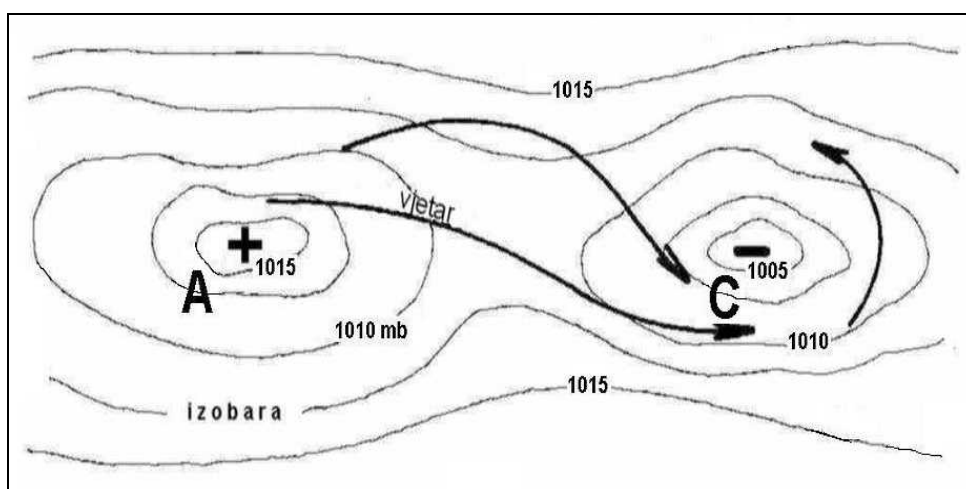
SI 3.1.1.1.3::1

Klasifikacija površinskih morskih valova prema primarnom generatoru i primarnoj umirujućoj sili

3.1.1.1 Nastajanje vjetrovnih valova

3.1.1.1.1 Vjetar

Vjetar je gibanje zraka uzrokovano razlikom tlaka na različitim mjestima tj. između anticiklone (A-polje povišenog tlaka) i ciklone (C-polje sniženog tlaka) Sl. 3.1.1.1.1::1. Vjetar u početku puše od anticiklone prema cikloni u smjeru maksimalnog gradijenta tlaka (okomito na izobare). Kako mu se povećava brzina raste i Coriolisova sila koja djeluje okomito na smjer strujanja i otklanja pravac vjetra u desno na sjevernoj polukugli. Postepenim povećanjem brzine jača Coriolisova sila, a time jača i otklanjanje smjera strujanja u odnosu na spojnicu A-C, odnosno: smjer strujanja teži smjeru izobara. Na koncu se formira kružno strujanje zraka oko centara ciklone i anticiklone velikih razmjera (geostrofičko strujanje u smjeru izobara).



Sl. 3.1.1.1.1::1 Kretanje vjetra na sjevernoj zemaljskoj polukugli od područja visokog tlaka (A) ka području niskog tlaka (C)

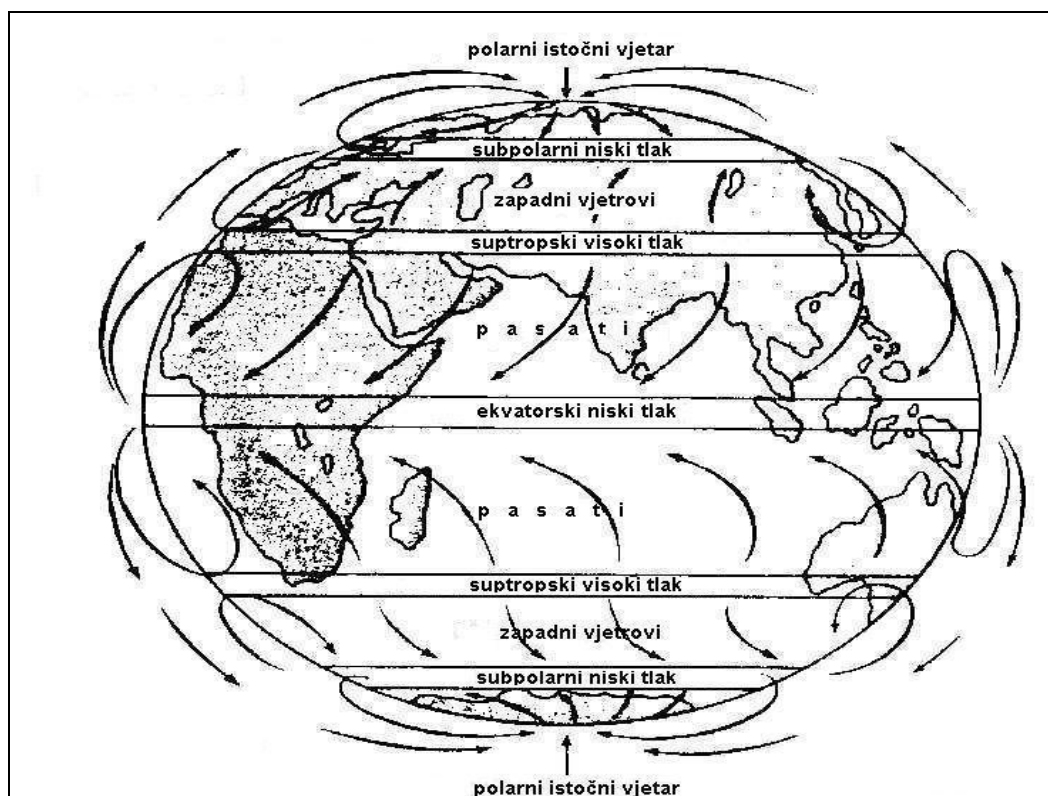
Vjetar se generira pod utjecajem pobuđujućih i umirujućih sila. Najznačajniji utjecaj na brzinu vjetra imaju tresričke sile koje su slučajne prirode (klimatske i turbulentne), a nešto manji astralne (centrifugalno ubrzanje ovisno o zemljopisnoj širini, coriolisova sila, ...) koje su više determinističke. Sve to realnom vjetru daje karakter slučajnog procesa. Brzina realnog vjetra, kao najinteresantniji graditeljsko-inženjerski parametar, stoga se opisuje statistički-vjerojatnosno i spektralno.

Drugi uzrok stalnih strujanja zraka je raspodjela toplih ekvatorskih i hladnih polarnih zračnih masa koje uvjetuju tzv. opću cirkulaciju zraka, a sastoji se od:

- pasata u ekvatorijalnom pojasu
- zapadnih vjetrova u umjerenom pojasu
- polarnih vjetrova kao što se vidi na Sl. 3.1.1.1.1::2.

Reprezentativne brzine vjetra su sredstvo opisa realnog vjetra; t.j. njegove slučajno varujabilne brzine. Kako je već rečeno vjetar je pojava slučajne prirode, a shodno tome i brzina mu slučajno varira. Stoga se brzina vjetra, za neko kratkoročno stacionarno stanje vjetra trajanja 10 minuta, mora prikazivati pomoću većeg broja statistički-vjerojatnosno reprezentativnih brzina koje uključuju njen varijabilitet. U inženjerskoj primjeni se za kratkoročna stanja vjetra koriste srednje brzine vjetra i udari vjetra. Određuju se iz

anemometarskog zapisa brzine vjetra. Shodno tipu instrumenta u nekoliko se razlikuju i definicije reprezentativnih brzina vjetra.



Sl. 3.1.1.1.1::2 Prikaz opće cirkulacije zraka na Zemlji

a) *Srednje brzine vjetra za kratkoročno stacionarno stanje vjetra*

Stariji tipovi anemografa davali su u zapisu kumulativni pređeni put (odnosno broj okretaja) po vremenu, pa se iz tog omjera određivala brzina vjetra. Razlučivost podataka bila je reda veličine 3-5 sekundi. Tada je računat

- 1 satni srednjak $\overline{U_{3600s}(z_m)}$ [m/s] kao prosjek sekundnih brzina iz satnog anemografskog zapisa na standardnoj visini $z_m=10[m]$. Nije više standardan.

Danas kada postoje digitalni anemometri mjerenja su sekundne razlučivosti. Iz tih mjerenja mogu se izračunati srednjaci kako slijedi:

- 2 desetminutni srednjak $\overline{U(z_m)} \equiv \overline{U_{600s}(z_m)}$ [m/s] je WMO (World Meteorologic Organisation) standardna ili "referentna odnosno karakteristična" brzina vjetra (EC) t.j. prosjek sekundnih brzina iz 10-minutnog anemografskog zapisa na standardnoj visini $z_m=10[m]$ iznad što ravnijeg terena bez okolnih prepreka, ili iznad morske površine..

Iz takvih 10-minutnih srednjih brzina vjetra može se izračunati:

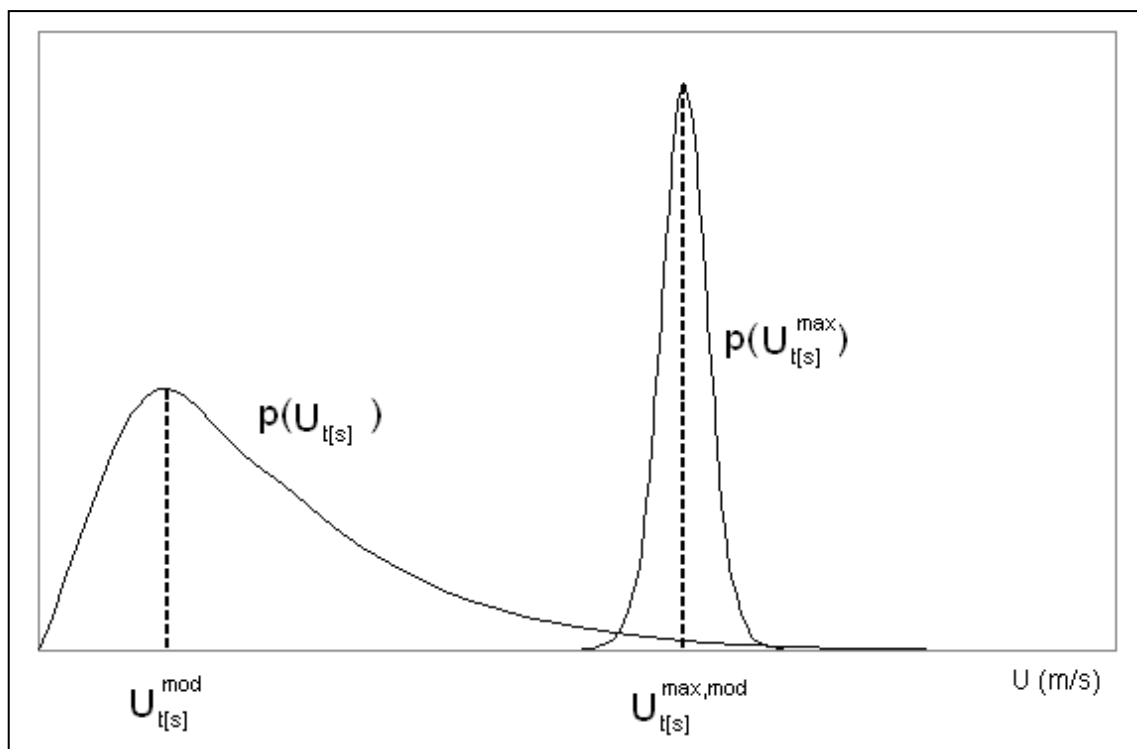
- 3 dnevni desetminutni srednjak je dnevni prosjek od 10-minutnih srednjaka
- 4 mjesečni desetminutni srednjak je mjesečni prosjek od 10-minutnih srednjaka
- 5 godišnji desetminutni srednjak je godišnji prosjek od 10-minutnih srednjaka

Iz 10-minutnih srednjih brzina vjetra mogu se izračunati i slijedeće maksimalne brzine vjetra:

- 6 dnevna maksimalna 10-minutna brzina vjetra je najveći 10 minutni srednjak u nekom danu
- 7 mjesečna maksimalna 10-minutna brzina vjetra je najveći 10 minutni srednjak u nekom mjesecu
- 8 godišnja maksimalna 10-minutna brzina vjetra je najveći 10 minutni srednjak u nekoj godini

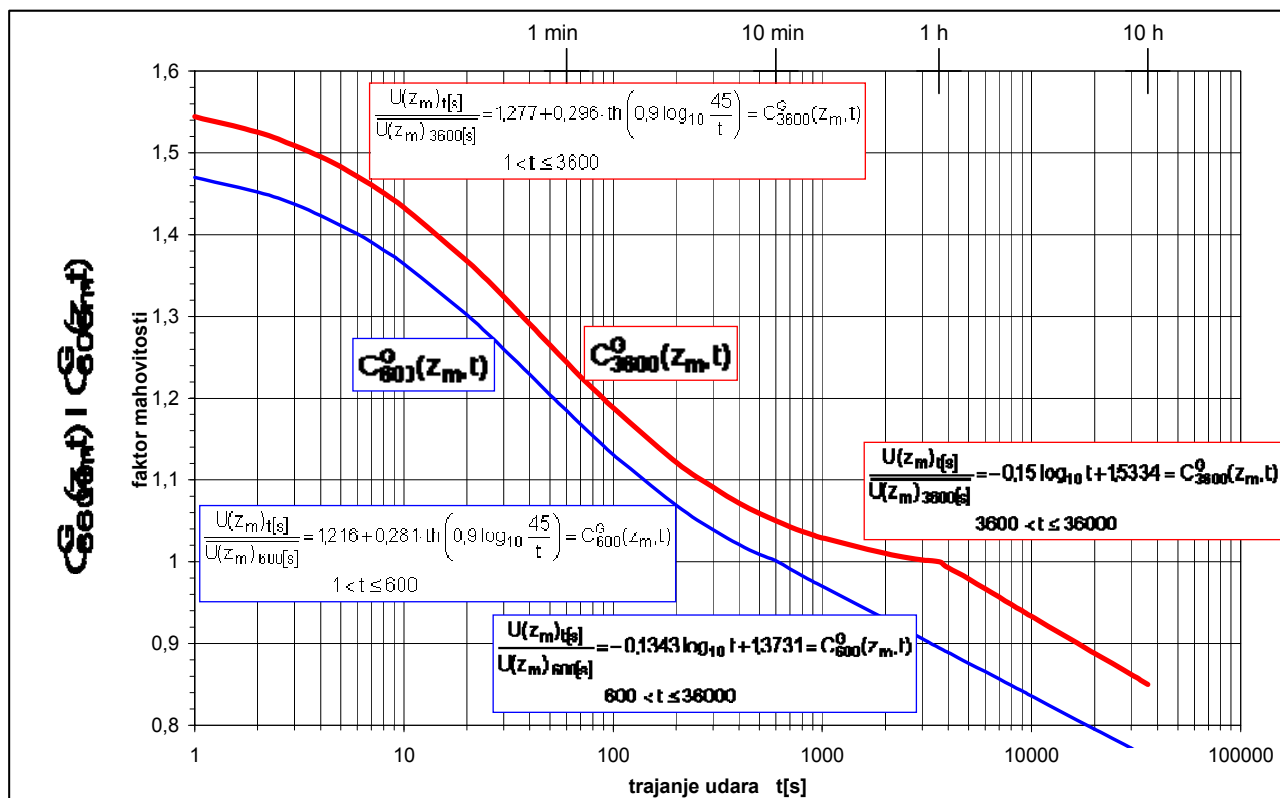
Sve gornje vrijedi i za satne srednjake brzine vjetra.

b) *Udari vjetra za kratkoročno stacionarno stanje vjetra*



Sl. 3.1.1.1.1::3 Prikaz funkcija gustoće slučajnih varijabli $U_{t[s]}$ i $U_{t[s]}^{\max}$ PM

Nema veze s valnom prognozom, ali zbog primjene kod opterećenja konstrukcija vjetrom, definirati će se i brzine udara (mahovitost, reful). Udar $U_{t[s]}(z_m)$ je najvjerojatniji "t-sekundni maksimum brzine vjetra" od niza "t-sekundnih maksimuma" dobivenih uzorkovanjem zapisa brzine vjetra trajanja 600 ili 3600[s] u "t-sekundnim odsječcima ili intervalima osrednjavanja. U mat. statistici naziva se još najučestaliji ili modalni maximum $U_{t[s]}^{\max, \text{mod}}(z_m)$, Sl. 3.1.1.1.1:3. Standardno se prikazuje na na standardnoj visini $z_m=10[m]$.



Sl. 3.1.1.1.1:4 Faktor mahovitosti vjetra $C_{3600}^G(z_m, t)$ za t-sekundni udar na visini $z_m[m]=10[m]$ kad je poznata srednja satna brzina vjetra $\overline{U_{3600[s]}}(z_m)$ na visini z_m ([28] CEM Coastal Engineering Manual Index, Part II: Coastal Hydrodynamics, U.S Army Corps of Engineers, i faktor mahovitosti vjetra $C_{600}^G(z_m, t)$ za t-sekundni udar na visini $z_m[m]=10[m]$ kad je poznata 10-minutna srednja brzina vjetra $\overline{U_{600[s]}}(z_m)$ na visini z_m (izveo autor); sve za standardni teren na kopnu $z_0=0,05[m]$

Za potrebe proračuna konstrukcija najčešće se određuje "1-sekundni udar"; t.j. "1-sekundni najvjerojatniji maksimum brzine vjetra" $U_{1[s]} [m/s]$. Udar bilo kojeg trajanja "t-sekundni udar" daje izračunati preko faktora mahovitosti iz srednje 10-minutne brzine vjetra $\overline{U_{600[s]}}$ kao:

$$U_{t[s]}(z_m) = C_{600}^G(z_m, t) \cdot \overline{U_{600[s]}}(z_m) \quad \text{ili konkretno} \quad U(z_m)_{1[s]} = C_{600}^G(z_m, t = 1[s]) \cdot \overline{U_{600[s]}}(z_m)$$

gdje je:

$t[s]$	trajanje t-sekundnog udara
$z_m[m]=10[m]$	standardna visina iznad tla ili mora
$U_{t[s]}(z_m) [m/s]$	t-sekundni udar vjetra na visini $z_m[m]$

$\overline{U_{600s}(z_m)} \equiv \overline{U(z_m)}$ [m/s] 10-minutna srednja brzina vjetra na visini z_m . Prema EC naziva se karakteristična brzina vjetra.

$C_{600}^G(z_m, t)$ faktor mahovitosti za t-sekundni udar na visini z_m kad je poznata 10-minutna srednja brzina vjetra na visini z_m

Izraz vrijedi i za bilo koju visinu $z \neq 10$ [m] no za to treba izračunati $\overline{U(z)}$ i poznavati faktor mahovitosti na visini $z \neq 10$ [m]. Faktor mahovitosti $C_{600}^G(z_m, t)$ za srednju 10-minutnu brzinu i $C_{3600}^G(z_m, t)$ za srednju satnu brzinu, na visini z_m [m]=10[m], dan je na Sl. 3.1.1.1.1.:4. Neke analize bure na Jadranu pokazale su da je faktor mahovitosti velebitske bure veći od ovoga na slici.

Iz 10-minutnog srednjaka brzine vjetra, dobivenog iz anemonetarskog zapisa sekundne razlučivosti, određuje se brzina udara vjetra:

- 9 udar vjetra t-sekundnog trajanja $U_{t[s]}$ je najvjerojatnija maksimalna osrednjena brzina t-sekundnog intervala u anemonetarskom zapisu: na pr. udar vjetra 1-sekundnog trajanja $U_{1[s]}$

c) *Srednje brzine i udari vjetra za dugoročna stanja vjetra*

Najčešća je inženjerska primjena brzine za dugoročna stanja vjetra. Koriste se srednje brzine i udari vjetra koji se proračunavaju iz velikog broja reprezentativnih brzina vjetra za kratkoročna stanja računom vjerojatnosti. Dakle dugoročna reprezentativna brzina vjetra je bilo koja kratkoročna reprezentativna brzina vjetra kojoj je pridružena neka mala vjerojatnost nastupa, ili dugo povratno razdoblje PR[god]. Na pr:

- 10 50-godišnji 10-minutni srednjak $\overline{U^{50g}(z_m)} \equiv \overline{U_{600s}^{50g}(z_m)}$ [m/s] na standardnoj visini $z_m=10$ [m]. Kod proračuna građevina prema EC naziva se i "referentna ili karakteristična brzina vjetra".
- 11 50-godišnji udar vjetra 1-sekundnog trajanja $U_{1[s]}^{50g}$. Kod proračuna građevina prema EC naziva se i "proračunska vrijednost brzine vjetra".

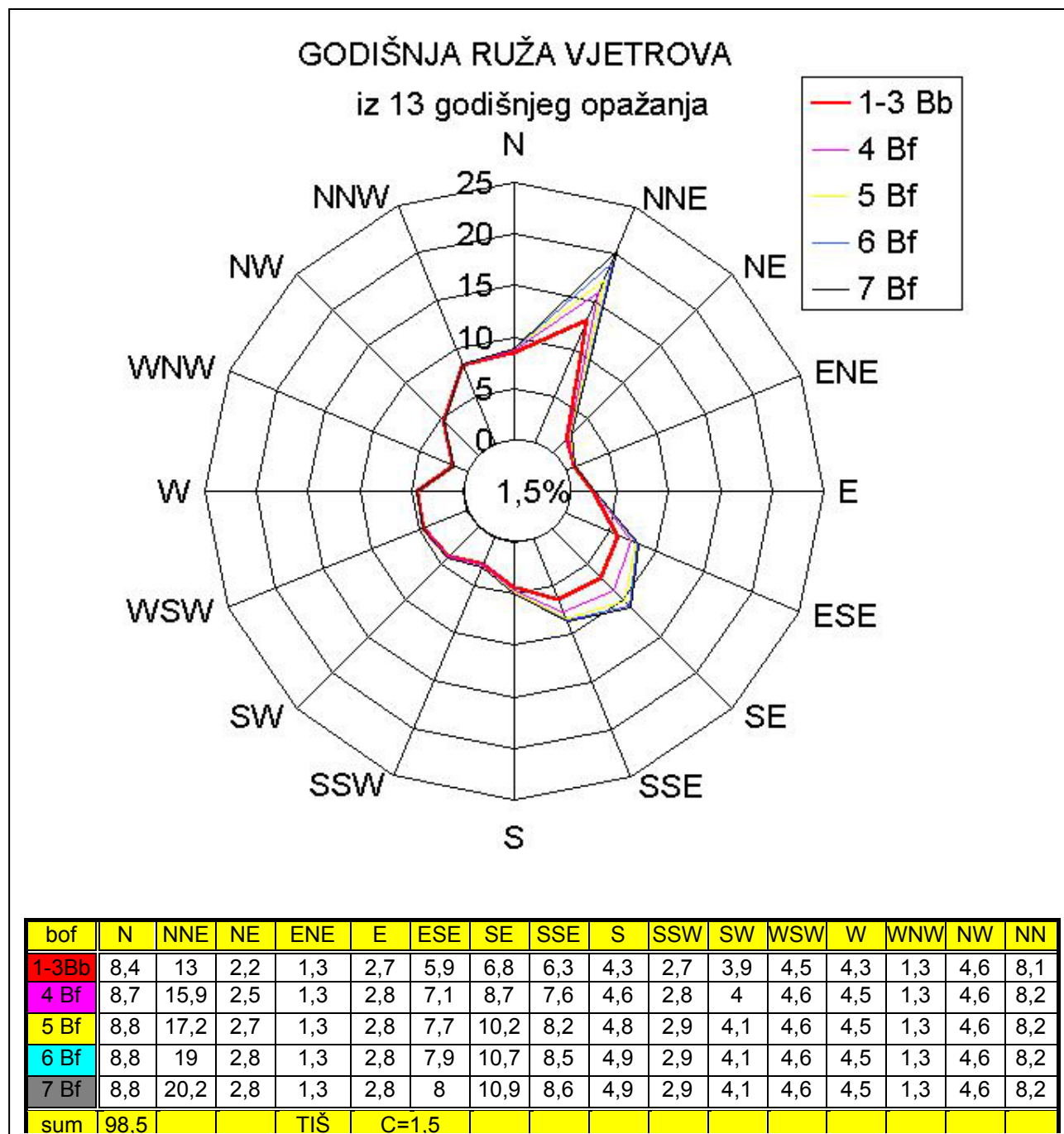
Projektna brzina vjetra za opterećenja građevina U_{proj} prema EC-u je 50-godišnji 1-sekundni udar na visini $z_m=10$ [m] t.j. $U_{proj} = U_{1[s]}^{50g}(z_m)$ [m/s]. Ako je poznata 50-godišnja karakteristična brzina vjetra, označena $\overline{U^{50g}(z_m)} \equiv \overline{U_{600s}^{50g}(z_m)}$ [m/s], onda se 50-godišnji sekundni udar; t. j. projektna brzina vjetra izračuna pomoću Sl. 3.1.1.1.1.:4 kao:

$$U_{1[s]}^{50g}(z_m) = C_{600}^G(z_m, 1[s]) \cdot \overline{U_{600[s]}^{50g}(z_m)} = U_{proj}, \text{ ili konkretno za vjetar nad morem otprilike}$$

$$U_{1[s]}^{50g}(z_m) = 1,47 \cdot \overline{U_{600[s]}^{50g}(z_m)}.$$

Spektar brzine vjetra: Vjetar je pojava slučajne prirode. Brzina mu slučajno varira i daje se opisati spektrom brzina.

Ako se **vjetar promatra na jednoj geografskoj točki**, generalnu kvantitativnu sliku vjetra u prosječnoj godini (ili nekom drugom razdoblju) kao što su smjerovi, brzine [m/s] te učestalosti pojave vjetra [%] prikazuje ruža vjetrova (Sl. 3.1.1.1.1.:5).



Sl. 3.1.1.1.1.:5 Prosječna godišnja ruža vjetrova iz 13-godišnjeg opažanja u Dubrovniku i tablica kontigencije vjetra (učestalost [%] parova smjer/jačina) iz koje je nacrtana ruža vjetrova

Brzina vjetra standardno se izražava u [m/s], no davno ranije opažala se vizualno i izražavala jačinom u stupnjevima Beaufort-a (Tab. 3.1.1.1.1::I).

Beauforti (Bf)	Naziv vjetra	Klasa brzine [m/s]
0	tišina	0.0-0.2
1	lagan povjetarac	0.3-1.5
2	povjetarac	1.6-3.3
3	slab vjetar	3.4-5.4
4	umjeren vjetar	5.5-7.9
5	umjereno jak vjetar	8.0-10.7
6	jak vjetar	10.8-13.8
7	vrlo jak vjetar	13.9-17.1
8	olujan vjetar	17.2-20.7
9	oluja	20.8-24.4
10	jaka oluja	24.5-28.4
11	orkanski vjetar	28.5-32.6
2	orkan	32.7-36.9

Tablica 3.1.1.1.1::I Klasifikacija vjetra prema brzini

Vertikalni profil brzine vjetra: U koliko se traži srednja 10-minutnoj brzini vjetra $\overline{U(z)}$ na nekoj visini z [m] (iznad tla ili mora) a raspolaže se brzinom $\overline{U(z_m)} = \overline{U_{600}(z_m)}$ na bilo kojoj visini z_m ona se može izračunati prema približnom vertikalnom eksponencijalnom profilu srednje brzine vjetra [Sim 43?, US Army Corps of Engineers"; Coastal Engineering Manual - CEM, Index; Part II: Coastal Hydrodynamics].

$$\overline{U(z)} = \overline{U(z_m)} \left(\frac{z}{z_m} \right)^\alpha$$

gdje je:

z [m] visina iznad tla na kojoj se traži brzina vjetra

z_m [m] visina iznad tla za koju postoji izmjerena brzina vjetra; standardno $z_m=10$ [m]

$\overline{U(z)}$ [m/s] 10-minutna srednja brzina vjetra na visini "z" iznad površine mora ili tla

$\overline{U(z_m)}$ [m/s] 10-minutna srednja brzina vjetra na visini " z_m " iznad površine mora ili tla (standardno $z_m=10$ [m]).

α eksponent: definiran je prema hrapavosti pa za za standardan otvoreni teren $z_o=0,05$ [m] (neobrađeno polje) Sim 43 [30] iznosi $\alpha=1/7$.

$$\overline{U(z)} = \overline{U(z_m)} \left(\frac{z}{z_m} \right)^{1/7}$$

Općeprihvaćen je i detaljniji logaritamski profil u kojem se uzima u obzir i hrapavost površine Sim 39 [30]:

$$\overline{U(z)} = \overline{U(z_m)} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right)},$$

gdje je:

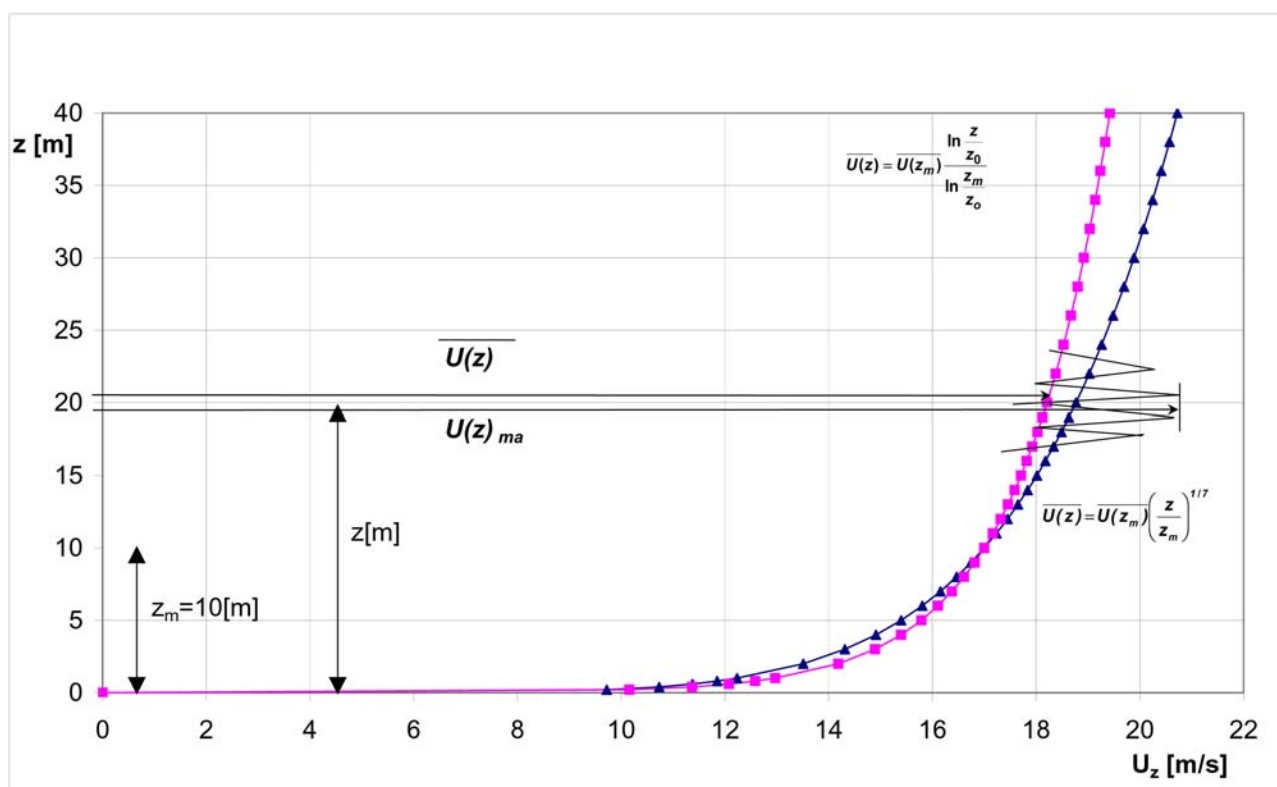
z_0 [m] dužina hrapavosti;

za valovitu morsku površinu kod brzine vjetra 14m/s $z_0 = 0,0006$ m; Sim42

za kopno $z_0 = 1/10$ srednje hrapavosti terena, raslinja i građevina (Tab 1-100); na pr. za

standardni otvoreni teren (neobrađeno polje) $z_0 = 0,05$ m. Sim42

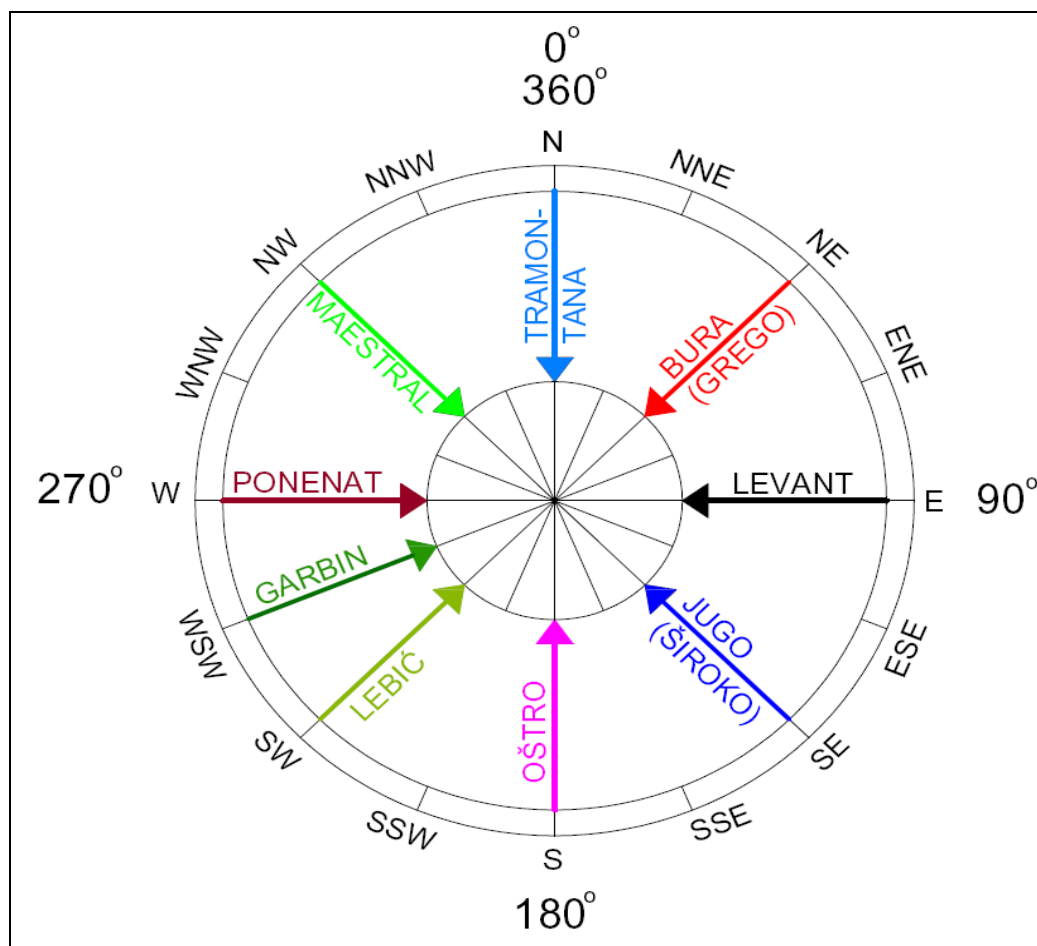
Komparacija eksponencijalno i logaritamskog profila dana je na Sl. 3.1.1.1.1::6 ([28,29] CEM - Coastal Engineering Manual: U.S Army Corps of Engineers"; Index; Part II: Coastal Hydrodynamics)



Sl. 3.1.1.1.1::6 Vertikalni profil srednje brzine vjetra

3.1.1.1.2 Vjetrovi na Jadranu

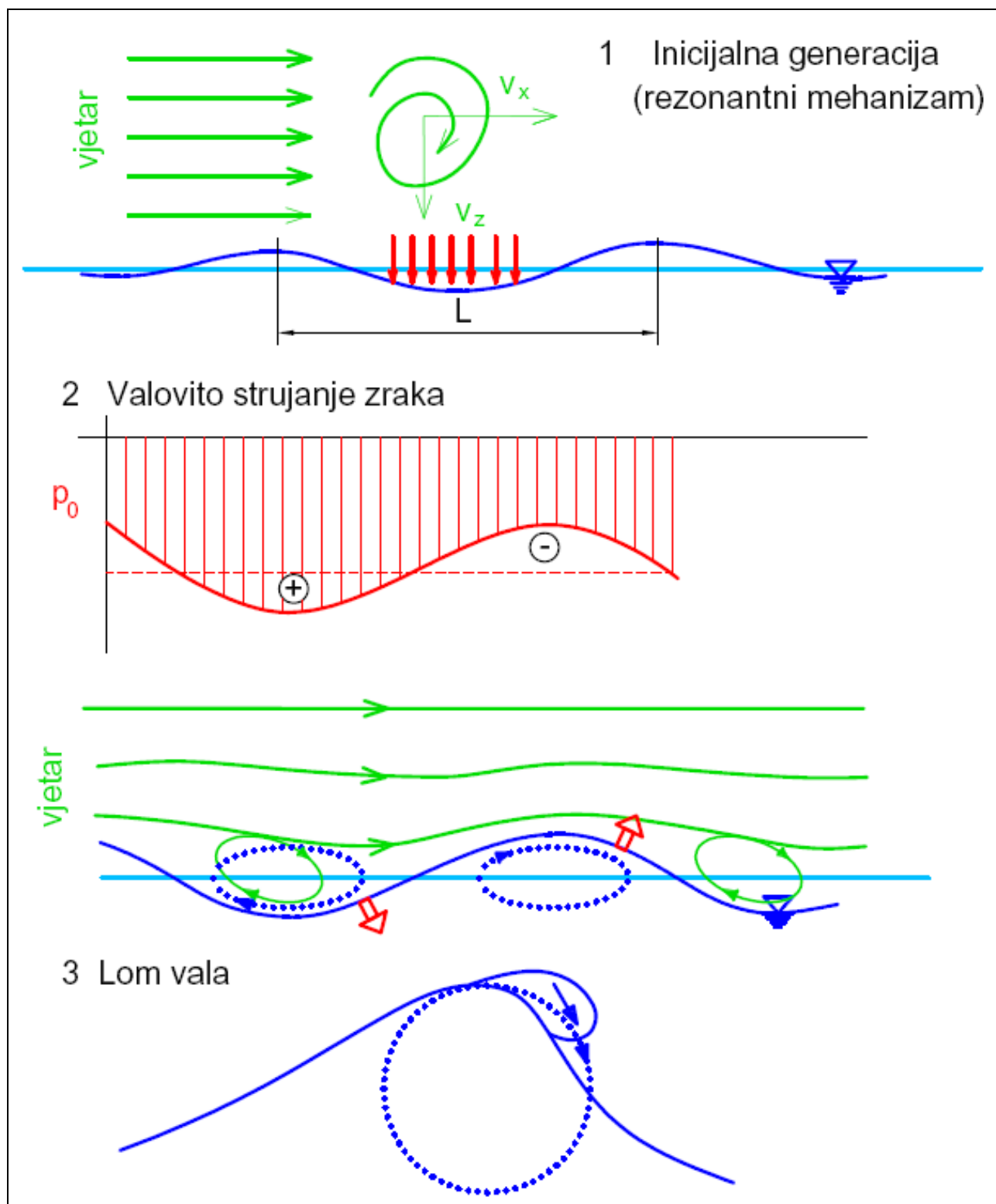
Vjetrovi na Jadranu i njihovi smjerovi puhanja imaju tradicionalne nazive koji su prikazani na vjetrulji (Sl. 3.1.1.1.2::1).



Sl. 3.1.1.1.2::1 Vjetrulja za Jadran

3.1.1.1.3 Generativni procesi vjetrovnih valova

Pod pojmom generiranja valova vjetrom smatra se prijenos energije s vjetra na valove preko kontaktne površine. Složenost mehanizma prijenosa energije sa vjetrova na valove otežava pokušaje opisivanja čak i osnovnih karakteristika tog mehanizma, stoga sam proces prijenosa energije s vjetra na valove još nije u potpunosti objašnjen. Pojednostavljena analiza valne generacije pretpostavlja vjetra konstantne brzine, iako on u prirodi varira od početka do smirenja. Postoji više teorija koje pokušavaju opisati proces generiranja valova kao i proces zamiranja valova nakon generiranja, no niti jedna od njih u potpunosti ne opisuje mehanizam prijenosa energije sa vjetra na valove. Također novija istraživanja pokazala su da zapravo sve teorije daju približno ista rješenja, otprilike jednako različita od vrijednosti dobivenih mjerenjima. Na temelju toga može se zaključiti da su modeli međudjelovanja vjetra i valova stigli do svoje gornje granice razvoja obzirom da se u posljednje vrijeme interes za analiziranjem vjetrovnih valova smanjio, a na temelju velikog broja prikupljenih podataka počeli su se u svijetu razvijati sustavi umjetnih neuralnih mreža za simulaciju i prognozu valnih visina.



Sl. 3.1.1.1.3::1 Tri osnovna mehanizma generiranja vjetrovnih valova

Mehanizmi valne generacije

Općenito, vjetrovni valovi generiraju se kroz tri faze, ili tri mehanizma (Sl. 3.1.1.1.3::1). 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 kao što ju imaju i pulsacije tlaka, pa nabori zbog rezonancije i dalje rastu.

Zatim slijedi druga faza, **valovito strujanje zraka** nad valnim profilom bez odvajanja strujnice, dešava se kod valova značajne visine. 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.

U posljednjoj fazi dolazi do **lomljenja valova**, kad se valovi malih valnih dužina lome na grebenima dugih valova, u toj fazi nastaju najveći valovi (biješe kape ili konjići i jako more). Kratki val koji se slomi na dugom dodaje impuls od svoje prebačene mase kinetičkoj energiji orbitalnog gibanja vodnih čestica dugog vala. Povećanjem kinetičke energije dugog vala raste mu i valna visina, pa se tako valna energija prenosi s kratkih na duge valove. Dominantna umirujuća sila im je gravitacija, pa pripadaju i gravitacijskim valovima.

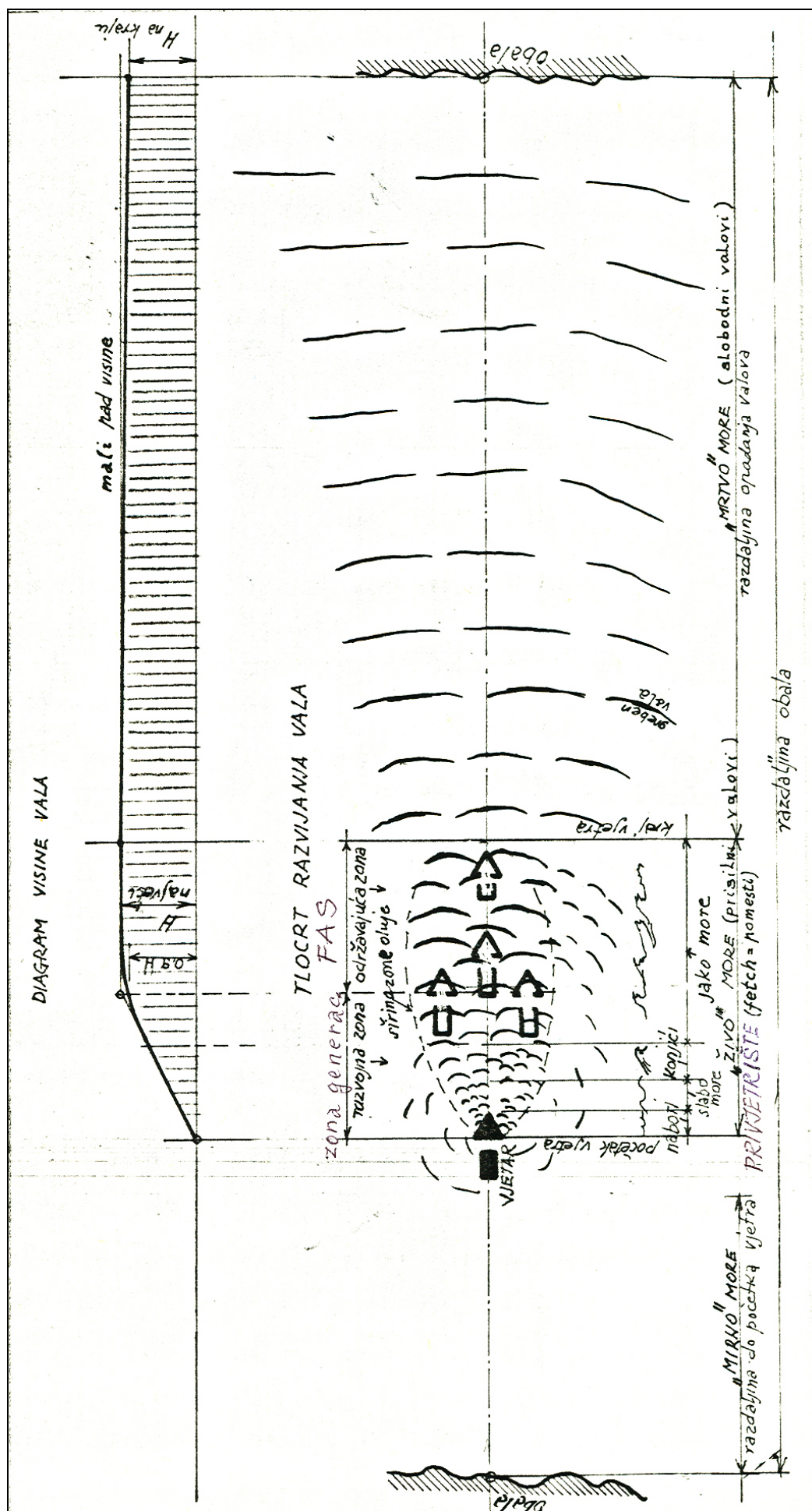
Tokom puhanja vjetra nad morem generiraju se istovremeno valovi raznih visina, dužina i perioda. Valna visina i dužina vjetrovnih valova ovisi o:

- privjetrištu – veličini morske površini iznad koje puše vjetar generirajući valove,
- vjetru; t.j. o brzini i trajanju vjetra,
- dubini mora i
- dužini zamiranja – morskoj površini koju valovi prevaljuju nakon što napuste privjetrište.

Općenito dulje privjetrište, veća brzina i trajanje vjetra: veći valovi. Dubina mora utiče samo ako je mala. Vjetar generira valove kratkih perioda u rasponu od 1 – 30[s], a za pomorske i vanobalne gradnje bitan je uži pojas perioda od 5 do 15[s].

Vezano za valnu generaciju vjetrovni valovi se pojavljuju u dva stanja (Sl. 3.1.1.1.3::2):

- a) valove živog mora, engl. seas, koji su pod utjecajem vjetra (prisiljeni valovi) i
- b) valove mrtvog mora (bibavica), engl. swell, koji nastaju od valova živog mora kad oni izađu iz privjetrišta i nisu više podvrgnuti djelovanju vjetra (slobodni valovi).



Sl. 3.1.1.1.3::2 Prostorni prikaz procesa generacije vjetrovnih valova

Povijesni pregled razvoja teorija generiranja vjetrovnih valova

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 . Kontaktne površine 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:

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

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

$$c^2 = \frac{g}{k} \left(\frac{1 - \rho_1/\rho_2}{1 + \rho_1/\rho_2} \right).$$

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

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

Gornja jednačica može se pisati u obliku

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

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

$$\frac{\sqrt{g/k}}{u} < \frac{1}{28}. \text{ Odnosno, dokle god je ispunjen gornji uvjet valovi su nestabilni i rastu po visini i periodu.}$$

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 pritiska 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 uzrokovano 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.

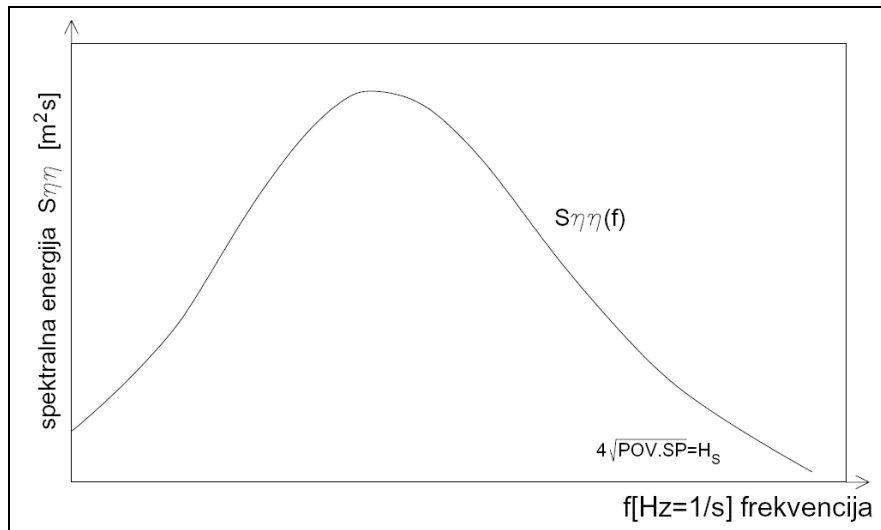
U toku generiranja valova, profil brzina vjetra iznad površine mora se mijenja. Brzina vjetra na bregovima nastalih valova bit će veća, a u dolovima manja što će rezultirati povećanjem pritiska na brijegu valova, a smanjenjem u dolu te će samim time vremenski porast valova biti brz, te rasti po eksponencijalnom 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 u ravnoteži je s lokalnim gradijentom brzine, dok se iznad tog sloja formira sloj u kojem se turbulencija ne može zanemariti. Ovaj mehanizam je srodan Jeffreyjevoj 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.

3.1.1.2 Spektralni opis valova kratkih perioda od vjetra

3.1.1.2.1 Definicija valnog spektra

Kao što su kod statističkog opisa nekog kratkoročnog stacionarnog stanja mora unutar 5 do 15 minuta osnovni pokazatelji H_s i $\bar{T}_0$, tako je kod spektralnog opisa osnovni pokazatelj spektar. Spektri sadrže kompletan varijabilitet tretiranih valnih parametara (E , η , a^2 , H , v_x , v_z , a_x , a_z) a matematički se opisuju u vidu funkcije spektralne gustoće po prostoru i vremenu; odnosno u domeni valnog broja (k) i frekventnoj domeni ($f=2\pi\omega$) kao na pr.: $S_{\eta\eta}(k,f)$. Ako se valovlje promatra u jednom trenutku onda je spektar funkcija samo od prostora; t.j. od valnog broja i naziva se trenutni spektar kao na pr.: $S_{\eta\eta}(k)$. Ako se valovlje promatra na jednoj točki onda je spektar samo funkcija od vremena; t.j. od frekvencije i naziva se lokalni spektar kao na pr.: $S_{\eta\eta}(f)$. Takvi će se spektri razmatrati u nastavku. Za opis fizičke površine mora postojati nekoliko alternativnih spektara : valni energetski spektar $E(f)$, spektar pomaka $S_{\eta\eta}(f)$ (Sl. 3.1.1.2.1::1), amplitudalni spektar $a^2(f)$ i spektar valnih visina $H(f)$, a za opis gibanja valnih čestica kod valova: spektar brzina $S_{uu}(f)$, $S_{ww}(f)$ i spektar ubrzanja vodnih čestica $S_{a_x a_x}$, $S_{a_z a_z}$. Pojedine vrste spektra se mogu transformirati u druge. Spektar pomaka $S_{\eta\eta}(f)$ često se naziva energetskim spektrom jer je proporcionalan specifičnoj energiji nepravilnog valnog polja:

$$\bar{E} = \rho g \int_0^{\infty} S_{\eta\eta}(f) df \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{m}^2} \right]$$



Sl. 3.1.1.2.1::1 Lokalni spektar pomaka fizičke površine mora

Postoje i relacije između statističkih valnih parametara i spektara. Na pr. u dubokoj vodi:

$$H_s = 4(m_0)^{1/2}$$

$$H_{rms} = 2 \cdot \sqrt{2} (m_0)^{1/2}$$

$$\bar{T} = 2\pi(m_0/m_2)^{1/2}$$

$$\bar{L} = \frac{2\pi}{g}(m_0/m_4)^{1/2},$$

gdja je m_i i-ti spektralni moment:

$$m_i = \int_0^{\infty} f^i S_{\eta\eta}(f) df,$$

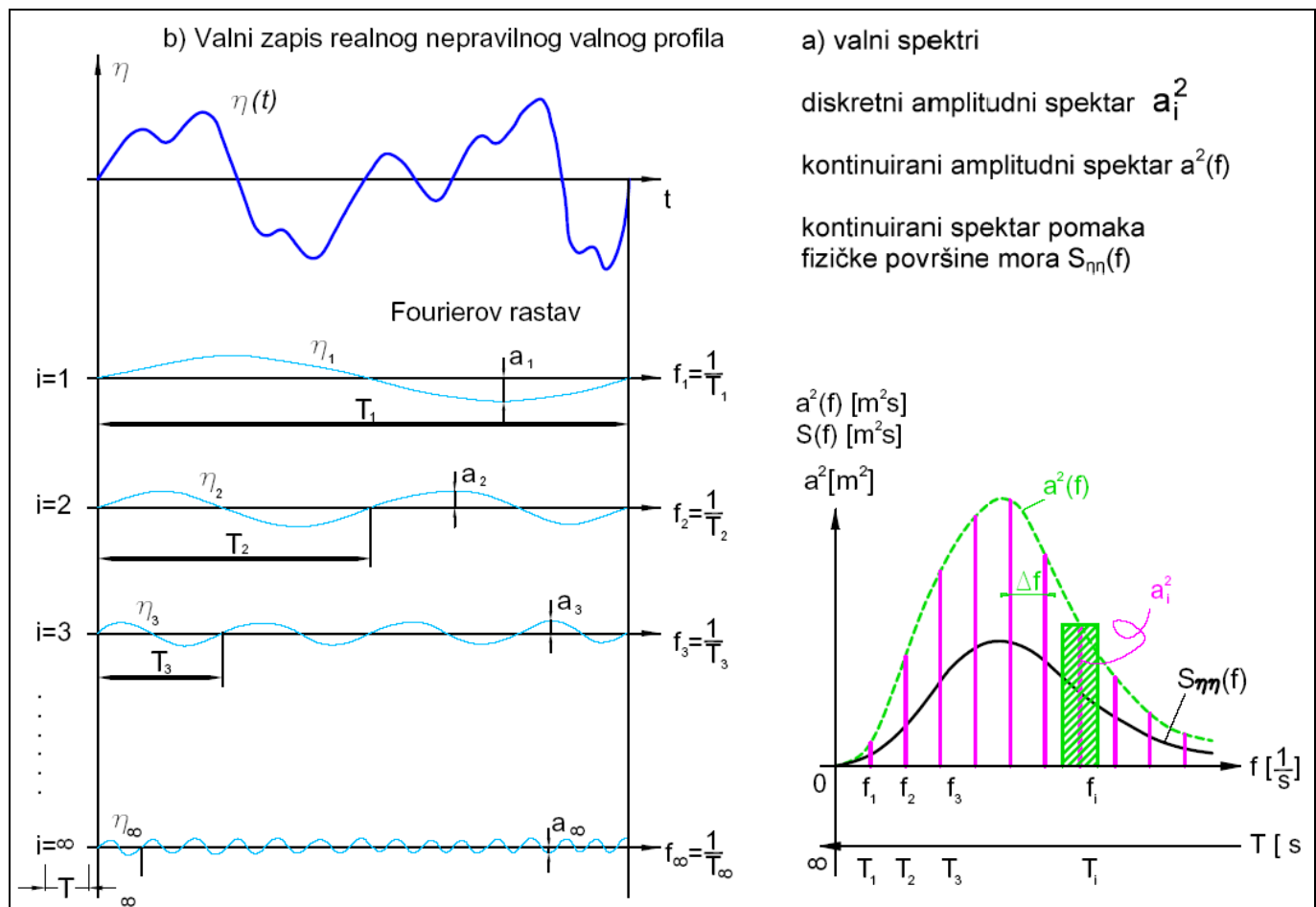
a m_0 nulti spektralni moment, ili površina spektra:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S_{\eta\eta}(f) df = \langle \eta^2(t) \rangle = \sigma_{\eta}^2 \quad \text{za } \bar{\eta} = 0.$$

Preko valnog spektra lako se daje pokazati da je H_{rms} ; t.j. korijen sredine kvadrata valnih visina energetski reprezentant nepravilnog valnog polja:

$$\bar{E} = \rho g \int_0^{\infty} S_{\eta\eta}(f) df = \rho g m_0 = \rho g \frac{4m_0^{1/2} 4m_0^{1/2}}{16} = \rho g \frac{H_s^2}{16} = \rho g \frac{2H_{rms}^2}{16} = \rho g \frac{H_{rms}^2}{8} \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{m}^2} \right]$$

Naime, lijeva strana pokazuje specifičnu energiju nepravilnog valnog polja, a desna energiju pravilnog linearnog vala između kojih je znak jednakosti.



Sl. 3.1.1.2.1::2 Diskretni amplitudni spektar a_i^2 , kontinuirani amplitudni spektar $a^2(f)$ i kontinuirani valni spektar $S_{\eta\eta}(f)$ slučajnog valnog zapisa $\eta(t)$ čiji Fourierov rastav predstavljaju spektralne komponente $\eta_1, \eta_2, \eta_3 \dots \eta_\infty$.

Osnovna ideja valnog spektra proizlazi iz izjednačenja specifične valne energije nepravilnog valnog polja i sume specifičnih valnih energija "n" ($n \rightarrow \infty$) spektralnih komponenti (pravilnih linearnih; t.j. sinusnih valova) na koje se nepravilni valni zapis daje Fourier-ovom analizom rastaviti (Sl. 3.1.1.2.1::2). Specifična valna energija svake od "n" komponenti diskretnog spektralnog rastava je:

$$\bar{E}_i = \rho g \frac{H_i^2}{8} = \rho g \frac{a_i^2}{2} \quad \forall \quad T_i \text{ odnosno } f_i = \frac{1}{T_i} = \frac{\omega_i}{2\pi}$$

a ukupna specifična energija (uz pretpostavku linearnosti procesa i međusobne nezavisnosti komponenti rastava) je suma energija svih komponenti rastava:

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^n \bar{E}_i = \rho g \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n a_i^2 \quad \left[\frac{J}{m^2} = \frac{N \cdot m}{m^2} \right]$$

Niz diskretnih kvadrata amplituda komponenti a_i^2 poredan je na slici Sl. 3.1.1.2.1::2 po pripadnim frekvencijama f_i stvarajući diskretni amplitudni spektar. Ako se umjesto niza

diskretnih amplituda a_i^2 uvede histogram $a^2(f_i)$ sa Sl. 3.1.1.2.1::2 tada je ukupna specifična valna energija

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^n \rho g \frac{a^2(f_i)}{2} \cdot \Delta f$$

Za $n \rightarrow \infty$ vrijedi: $\Delta f \rightarrow df$, $f_i \rightarrow f$, $a^2(f_i) \rightarrow a^2(f)$; t.j. histogram $a^2(f_i)$ prelazi u kontinuiranu funkciju $a^2(f)$ (crtkana krivulja sa Sl. 3.1.1.2.1::2), pa slijedi:

$$\bar{E} = \int_0^{\infty} \rho g \frac{a^2(f)}{2} \cdot df \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right]$$

Specifična valna bilo kojeg sinusnog vala frekvencije "f" iz spektralnog rastava prema linearnoj teoriji je:

$$\bar{E}(f) = \rho g \frac{a^2(f)}{2} \quad \left[\frac{\text{J/m}^2}{1/\text{s}} \right]$$

Kontinuirana funkcija $\bar{E}(f)$ naziva se funkcija spektralne gustoće valne energije, ili valni energetski spektar. Dalje vrijedi da je površina ispod energetskog spektra $\bar{E}(f)$ specifična valna energija nepravilnog valnog polja.

$$\bar{E} = \int_0^{\infty} \bar{E}(f) df$$

Za oblik energetskog spektra $\bar{E}(f)$ množenje s konstantom ρg ne znači ništa pa se može pisati:

$$\bar{E}(f) = \rho g \frac{a^2(f)}{2} = \rho g \cdot S_{\eta\eta}(f) \text{ gdje je:}$$

$$S_{\eta\eta}(f) = \frac{a^2(f)}{2} \quad [\text{m}^2\text{s}]$$

funkcija spektralne gustoće, ili spektar, izdizanja fizičke površine mora. Ukupna specifična energija nepravilnog valnog polja tada je:

$$\bar{E} = \rho g \int_0^{\infty} S_{\eta\eta}(f) df.$$

Zbog istih svojstava kao $\bar{E}(f)$ funkcija $S_{\eta\eta}(f)$ često je sinonim za energetski valni spektar, dok se funkcija $a^2(f)$ naziva amplitudni spektar.

Valni spektar u frekventnoj domeni može se izraziti preko kutne frekvencije ω [rad/s]. No može se načiniti i periodični spektar u domeni valnog perioda spektralnih komponenti (linearnih valova na koje se nepravilni valni zapis daje rastaviti Fourier-ovim rastavom). Transformacijski izraz proizlazi iz $\bar{E} = \rho g \int S_{\eta\eta}(f) df = \rho g \int S_{\eta\eta}(\omega) d\omega = \rho g \int S_{\eta\eta}(T) dT$:

$$S_{\eta\eta}(f) = 2\pi \cdot S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{1}{f^2} S_{\eta\eta}(T)$$

$$S_{\eta\eta}(f) = 2\pi \cdot S_{\eta\eta}(\omega) \quad \text{ili} \quad S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{1}{2\pi} S_{\eta\eta}(f) \quad \text{ili} \quad S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{2\pi}{\omega^2} S_{\eta\eta}(T)$$

3.1.1.2.2 Neke relacije valnog spektra

Kad je jednom poznat spektar pomaka $S_{\eta\eta}(f)$ iz njega se mogu dobiti ostali spektri: Spektar brzina $S_{uu}(f)$, $S_{ww}(f)$ i spektar ubrzanja vodnih čestica $S_{a_x a_x}$, $S_{a_z a_z}$, te sintetički nepravilni valni profil $\eta(x,t)$.

Spektar brzina vodnih čestica $S_{uu}(f)$, $S_{ww}(f)$

$$S_{uu}(f) = \left[2\pi f \cdot \frac{\text{ch}[k(z+d)]}{\text{sh}(kd)} \right]^2 \cdot S_{\eta\eta}(f) \quad S_{ww}(f) = \left[2\pi f \cdot \frac{\text{sh}[k(z+d)]}{\text{sh}(kd)} \right]^2 \cdot S_{\eta\eta}(f)$$

Spektar ubrzanja vodnih čestica $S_{a_x a_x}(f)$ i $S_{a_z a_z}(f)$

$$S_{a_x a_x}(f) = \left[(2\pi f)^2 \cdot \frac{\text{ch}[k(z+d)]}{\text{sh}(kd)} \right]^2 \cdot S_{\eta\eta}(f) \quad S_{a_z a_z}(f) = \left[(2\pi f)^2 \cdot \frac{\text{sh}[k(z+d)]}{\text{sh}(kd)} \right]^2 \cdot S_{\eta\eta}(f)$$

Očigledna je i relacija:

$$S_{a_x a_x}(f) = (2\pi f)^2 \cdot S_{uu}(f) \quad S_{a_z a_z}(f) = (2\pi f)^2 \cdot S_{ww}(f)$$

Sintetički nepravilni valni profil $\eta(x,t)$

Kod fizikalnog modeliranja valnih ponašanja i valnih interakcija s objektima u laboratorijskom kanalu javlja se potreba generiranja nepravilnog valnog profila $\eta(t)$ (Sl. 3.1.1.2.1::2a) valnim generatorom iz poznatog valnog spektra. Tada za elektronsko upravljanje valnim generatorom treba sintetički nepravilni valni profil; t. j. matematički izraz koji upravlja valnim generatorom tako da proizvodi nepravilni valni profil $\eta(t)$. No sintetički nepravilni valni zapis potreban je i kod matematičkog modeliranja problema koji se ispituju fizikalnim modeliranjem. Obadva spomenuta sintetička nepravilna valna profila dade se inačiti ako je poznat neusmjereni lokalni valni spektar $S_{\eta\eta}(f)$; t. j. 2D valni spektar u ravnini X,Z. Pritom je je X usmjeren u pravcu rasprostiranja valova odnosno puhanja vjetra.

Sintetički nepravilni valni profil $\eta(x,t)$ na nekom mjestu $x[m]$ i kroz vrijeme $t[s]$ izvodi se iz principa da se on izražava kao suma od "m" ($m \rightarrow \infty$) diskretnih spektralnih komponenti $\eta_i(x,t)$; t. j. kao suma linearnih valova na koje se nepravilni valni zapis daje rastaviti Foureir-ovim rastavom (Sl. 3.1.1.2.1::2a):

$$\eta(x,t) = \sum_{i=1}^m \eta_i(x,t) \cdot$$

Pritom je svaka od "m" spektralnih komponenti:

$$\eta_i(x,t) = a_i \cos(k_i x - \omega_i t) = a_i \cos(k_i x - 2\pi f_i t)$$

$\eta_i(x,t)$ [m]	i-ta diskretna spektralna komponenta; t. j. i-ti linearni val na koje se nepravilni valni zapis daje rastaviti Foureir-ovim rastavom (Sl. 3.1.1.2.1::2a)
$i=1....m$	redni broj poretka diskretnih spektralnih komponenti poredanih po rastućim frekvencijama
$m \rightarrow \infty$	broj diskretnih spektralnih komponenti na koje se kontinuirani valni spektar rastavlja

Praktičan postupak je takav da se spektar diskretizira na konačni broj od "m" inkremanata veličine $\Delta f[1/s=Hz]=f_{max}/m$ (Sl. 3.1.1.2.1::2b). f_{max} se uzima na mjestu gdje je za praktične svrhe $S_{\eta\eta}(f) \sim 0$; t. j. $a^2(f_i) \sim 0$. Frekvencija f_i i valni broj k_i diskretne spektralne komponente dade se odrediti s valnog spektra $S_{\eta\eta}(f)$ prema spomenutoj slici

$f_i[1/s=Hz]$	kružna frekvencija i-te diskretne spektralne komponente $\eta_i(x,t)$ (na sredini inkrementa Δf , Sl. 3.1.1.2.1::2b); t. j. linearnog vala na koje se nepravilni valni zapis daje rastaviti Foureir-ovim rastavom (Sl. 3.1.1.2.1::2b)
$\omega_i=2\pi f_i=2\pi/T_i[rad/s]$	kutna frekvencija i-te diskretne spektralne komponente $\eta_i(x,t)$
$\Delta f[1/s=Hz]=f_{max}/m$	frekventni inkrement svake i-te diskretne spektralne komponente $\eta_i(x,t)$
$T_i=1/f_i[s]$	period i-te diskretne spektralne komponente $\eta_i(x,t)$ (Sl. 3.1.1.2.1::2b); t. j. linearnog vala na koje se nepravilni valni zapis daje rastaviti Foureir-ovim rastavom (Sl. 3.1.1.2.1::2a)
$k_i = (2\pi)^2 \frac{(f_i)^2}{g}$ [rad/m]	valni broj i-te diskretne spektralne komponente $\eta_i(x,t)$ za duboku vodu iz disperzijske relacije $\omega_i^2=gk_i$ th($k_i d$) što za duboku vodu daje $k_i=(2\pi f_i)^2/g$
$k_i = \frac{2\pi}{L_i}$ [rad/m]	valni broj i-te diskretne spektralne komponente $\eta_i(x,t)$ u prijelaznom ili plitkom moru
$L_i = \frac{g}{2\pi f_i} \text{th} \frac{2\pi d}{L_i}$ [m]	valna dužina i-te diskretne spektralne komponente $\eta_i(x,t)$ čije se određivanje provodi iteracijom za i-tu frekvenciju f_i .

Amplituda a_i i-te diskretne spektralne komponente $\eta_i(x,t)$ dade se odrediti s valnog spektra $S_{\eta\eta}(f)$ prema slici (Sl. 3.1.1.2.1::2b) kao:

$$a_i = \sqrt{2S_{\eta\eta}(f_i) \Delta f_i}$$

pa je onda i-ta diskretna spektralna komponenta

$$\eta_i(x, t) = \sqrt{2S_{\eta\eta}(f_i) \Delta f_i} \cos(k_i x - 2\pi f_i t).$$

Sintetički nepravilni valni profil $\eta(x, t)$ dobije se uvrštavanjem i -te diskretne spektralne komponente $\eta_i(x, t)$ u

$$\text{izraz } \eta(x, t) = \sum_{i=1}^m \eta_i(x, t)$$

$$\eta(x, t) = \sum_{i=1}^m \eta_i(x, t) = \sum_{i=1}^m \sqrt{2S_{\eta\eta}(f_i) \Delta f_i} \cos(k_i x - 2\pi f_i t)$$

Gornji sintetički nepravilni valni profil bit će kod svake njegove izrade isti po vremenu. Ako se želi da svaki puta bude drukčiji treba dodati slučajni fazni pomak $\alpha_{f,i}$ svake diskretne spektralne komponente $\eta_i(x, t)$ koji leži u području $[0, 2\pi]$. To formu same diskretne spektralne komponente ništa ne mijenja samo ju pomiče naprijed ili nazad u vremenu. No da slučajni fazni pomak bude uvijek drukčiji omogućava slučajni broj R_i (iz tablice ili kompjutorskog generatora slučajnih brojeva), pridružen svakoj diskretnoj spektralnoj komponenti, $\eta_i(x, t)$ čiji je interval vrijednosti $[0, 1]$:

$\alpha_{f,i} = 2\pi R_i [\text{rad}]$	slučajni fazni pomak diskretne spektralne komponente $\eta_i(x, t)$, $\alpha_{f,i} [0, 2\pi]$
R_i	slučajni broj R_i pridružen svakoj diskretnoj spektralnoj komponenti, $R_i [0, 1]$.

Uvrštavanjem slučajnog faznog pomaka $\alpha_{f,i}$ u svakoj diskretnoj spektralnoj komponenti $\eta_i(x, t)$ sintetički nepravilni valni profil bit će kod svake njegove izrade različit po vremenu:

$$\eta(x, t) = \sum_{i=1}^m \eta_i(x, t) = \sum_{i=1}^m \left[\sqrt{2S_{\eta\eta}(f_i) \Delta f_i} \cos(k_i x - 2\pi f_i t + \alpha_{f,i}) \right].$$

Gornji izraz je prikladan za matematičko modeliranje, a za fizikalno ke valni generator uvijek na istom mjestu $x=0$, pa vrijedi:

$$\eta(x, t) = \sum_{i=1}^m \eta_i(x, t) = \sum_{i=1}^m \left[\sqrt{2S_{\eta\eta}(f_i) \Delta f_i} \cos(-2\pi f_i t + \alpha_{f,i}) \right].$$

Često se koristi i:

$$\eta(x, t) = \sum_{i=1}^m \eta_i(x, t) = \sum_{i=1}^m \left[\sqrt{2S_{\eta\eta}(f_i) \Delta f_i} \cos(2\pi f_i t + \alpha_{f,i}) \right].$$

Empirijski valni spektar

Empirijski valni spektar je onaj koji se dobije na temelju izmjerene valnog polja. Ako je na raspolaganju valni zapis $\eta(t)$ na jednoj zemljopisnoj točki onda se valni lokalni spektar može dobiti njegovom obradom na 3 načina:

- direktno Fourier-ovom transformacijom prema izrazu

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \lim_{\frac{\Lambda}{T} \rightarrow \infty} \left[\frac{4\pi}{\frac{\Lambda}{T}} |G_{\eta\eta}^{\frac{\Lambda}{T}}(\omega)|^2 \right]$$

$\frac{\Lambda}{T}$ dužina valnog zapisa [s]

$G_{\eta\eta}^{\frac{\Lambda}{T}}$ Fourier-ov transformat

- indirektno preko autokorelacijske funkcije valnog zapisa $R_{\eta\eta}(\tau)$ prema izrazu:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_{\eta\eta}(\tau) \cdot \cos(\omega\tau) d\tau \quad i$$

- brzom Fourier-ovom transformacijom (FFT).

Ako se ne raspolaže valnim zapisom spektar se može prognozirati posredno iz podataka o vjetru, ili iz podataka o reprezentativnim valnim visinama (na pr. spektri PM, ISSC, ITTC, JONSWAP..).

Sve ove metode u svom matematičkom aparatu pretpostavljaju beskonačno dug uzorak ($\frac{\Lambda}{T} \rightarrow \infty$) što nije na raspolaganju. Stoga su razrađene metode kojima se, uz pomoć spektralnog prozora ili filtera, iz ograničenog uzorka dobije spektar koji se najbolje približava teoretskom koji ima $\frac{\Lambda}{T} \rightarrow \infty$.

Slično kao što se mogu načiniti spektri u frekventnoj domeni mogu se činiti i spektri $S_{\eta\eta}(k)$ u domeni valnog broja "k". Potreban podatak za to je stereografska snimka realnog valnog polja.

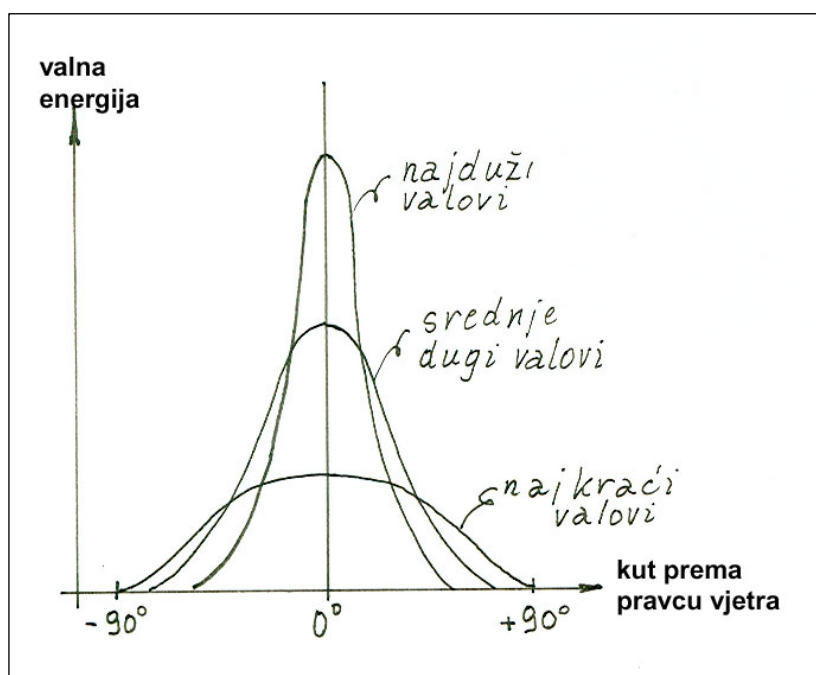
3.1.1.3 Značajke valova živog mora

Živo more ili valovi živog mora (engl. seas) su vjetrovni valovi unutar privjetrišta, tj. prisiljeni valovi podvrgnuti djelovanju pobuđujuće sile – vjetra ^{NMOE47}. Imaju fazu razvitka ili stanje nepotpuno razvijenog mora (zona razvojnih mehanizama) gdje vjetar stalno dodaje svoju energiju valovima idući niz vjetar i gdje valna visina raste. Iza toga, na dovoljno dugom privjetrištu i po dovoljno dugom trajanju vjetra, dostiže se stanje potpuno razvijenog mora gdje se valna visina i drugi parametri valnog profila održavaju konstantnima. U zoni potpuno razvijenog mora, bez obzira na privjetrište i trajanje vjetra, prijenos energije s vjetra na valove više nije moguć, pa valna visina više ne raste. Stanje mora u ovakvom slučaju je stacionarno. Fizička površina mora je mnogo konfuznija nego li kod valova mrtvog mora. Strmina valova je velika: $H/L = 1/10-1/20$, što znači da valna dužina iznosi samo 10-20 valnih visina, CERC 1-5.

Vezano uz pojam potpuno razvijenog mora javlja se i pojam **starosti valova**. Starost valova predstavlja bezdimenzionalnu veličinu i to odnos brzine rasprostiranja vala i brzine vjetra (različiti autori ovaj pojam različito definiraju obzirom na odabir brzine). Razni autori su dali razne kriterije za određivanje potpuno razvijenog mora, no više manje svi su vezani upravo na starost vala.

Valovi živog mora razvijaju se u obliku višesmjernog spektra, što znači da se rasprostiru u polju od 180° (po 90° sa svake strane pravca vjetra). Najdužim valovima je gotovo sva energija koncentrirana oko 0° , a najkraćima je raspršena na svih 180° (Slika 3.1.1.3::1) ^{Silv}

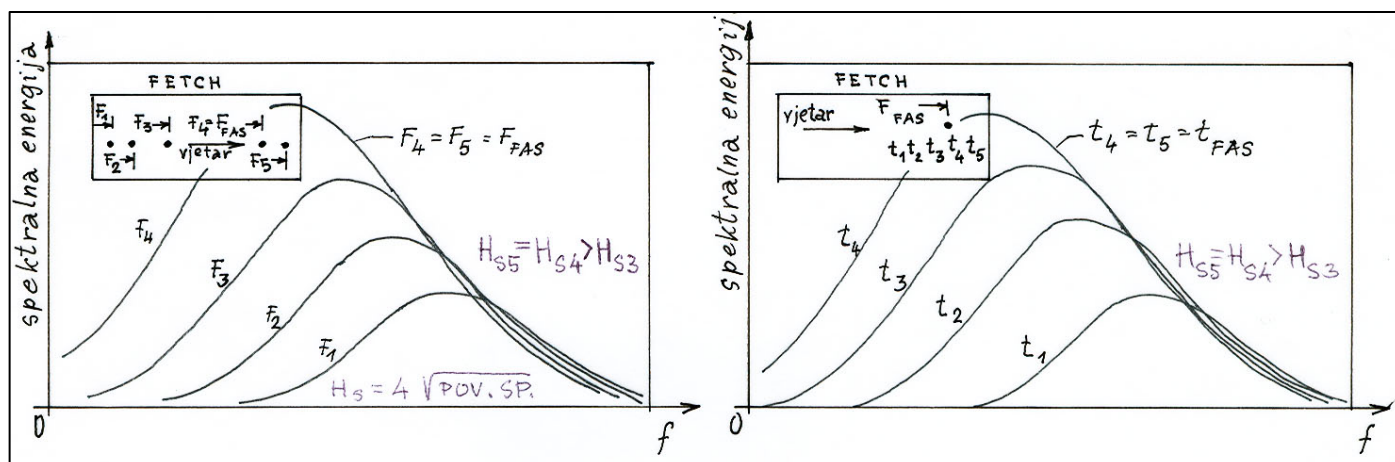
35



Slika 3.1.1.3::1 Kutna disperzija valne energije živog mora po smjerovima kod neke stalne brzine vjetra

Promotrimo niz neusmjerenih spektara na nekih 5 mjernih

točaka uzduž privjetrišta u toku jedne hipotetičke oluje stalne brzine vjetra (Sl. 3-1.1.3::2). Ako je, uz dovoljno dugo trajanje vjetra, mjerna točka 4 smještena u privjetrištu iza razvojne zone tada će spektar reprezentirati održavajuću zonu, tj. zonu potpuno razvijenog mora FAS (Fully Arisen Sea): $F_4 = F_{FAS}$ [km]. Dakle FAS je stanje mora kad se postiže maksimalni mogući transfer energije vjetra na valove iznad kojeg nije moguć njen porast (porast valne visine) uz danu brzinu vjetra. Silv22

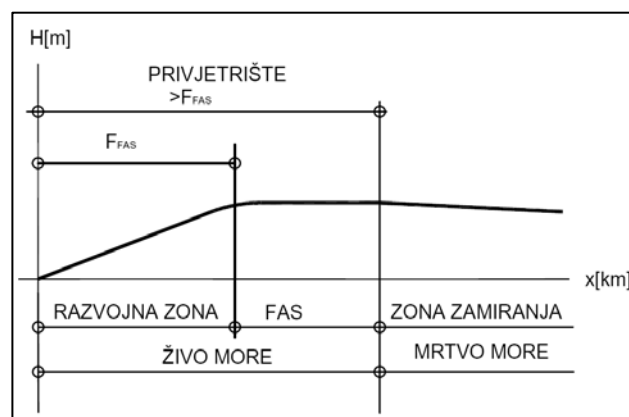


Slika 3.1.1.3::2 Valni spektri za razne dužine privjetrišta (F_i) i razna trajanja vjetra (t_i) konstantne brzine

Spektar je u cijelom FAS jednak, tj.:

$$\bar{E} = \bar{E}^{\max} = \text{const} \quad \forall \quad F \geq F_{FAS}; t \geq t_{FAS}$$

$$\bar{E} < \bar{E}^{\max} \quad \forall \quad F < F_{FAS}; t \geq t_{FAS}$$



Uočljivo je da se na kraćem privjetrištu F_1 , F_2 i F_3 generiraju niži (manja površina spektra) i kraći (spektri pozicionirani desno) valovi Silv 31. S druge strane da bi se na dovoljno dugom privjetrištu postigao FAS potrebno je trajanje vjetra t_{FAS} [h] ispod kojeg se razvija polje valova manje energije, a iznad kojeg energija valnog polja više ne može rasti: Silv 37

$$\bar{E} = \bar{E}^{\max} = \text{const} \quad \forall \quad t \geq t_{FAS}; F \geq F_{FAS}$$

$$\bar{E} < \bar{E}^{\max} \quad \forall \quad t < t_{FAS}; F \geq F_{FAS}$$

Za FAS se može reći da je tada valovlje stacionaran proces čije se statističke i spektralne značajke ne mijenjaju.

3.1.1.4 Značajke valova mrtvog mora

Valovi mrtvog mora prostorno su smješteni nizvjetarno od privjetrišta. Visina im stalno opada u smjeru rasprostiranja zbog trenja unutar tekućine i na dnu mora. Kad valovi generirani od udaljene oluje izađu iz privjetrišta oni mogu putovati stotinama i tisućama kilometara zonom zamiranja prije nego li reagiraju s dnom kod nasuprotne obale. Pod takvim uvjetima zamiru kratki valovi, strmi valovi se eliminiraju, a samo niski i relativno dugi valovi dosižu udaljenu obalu. Strmine takvih valova su $H/L = 1/30 \div 1/200$ i zovu se valovi mrtvog mora ili bibavica. To su u stvari slobodni valovi koji nisu podvrgnuti djelovanjugeneratora.

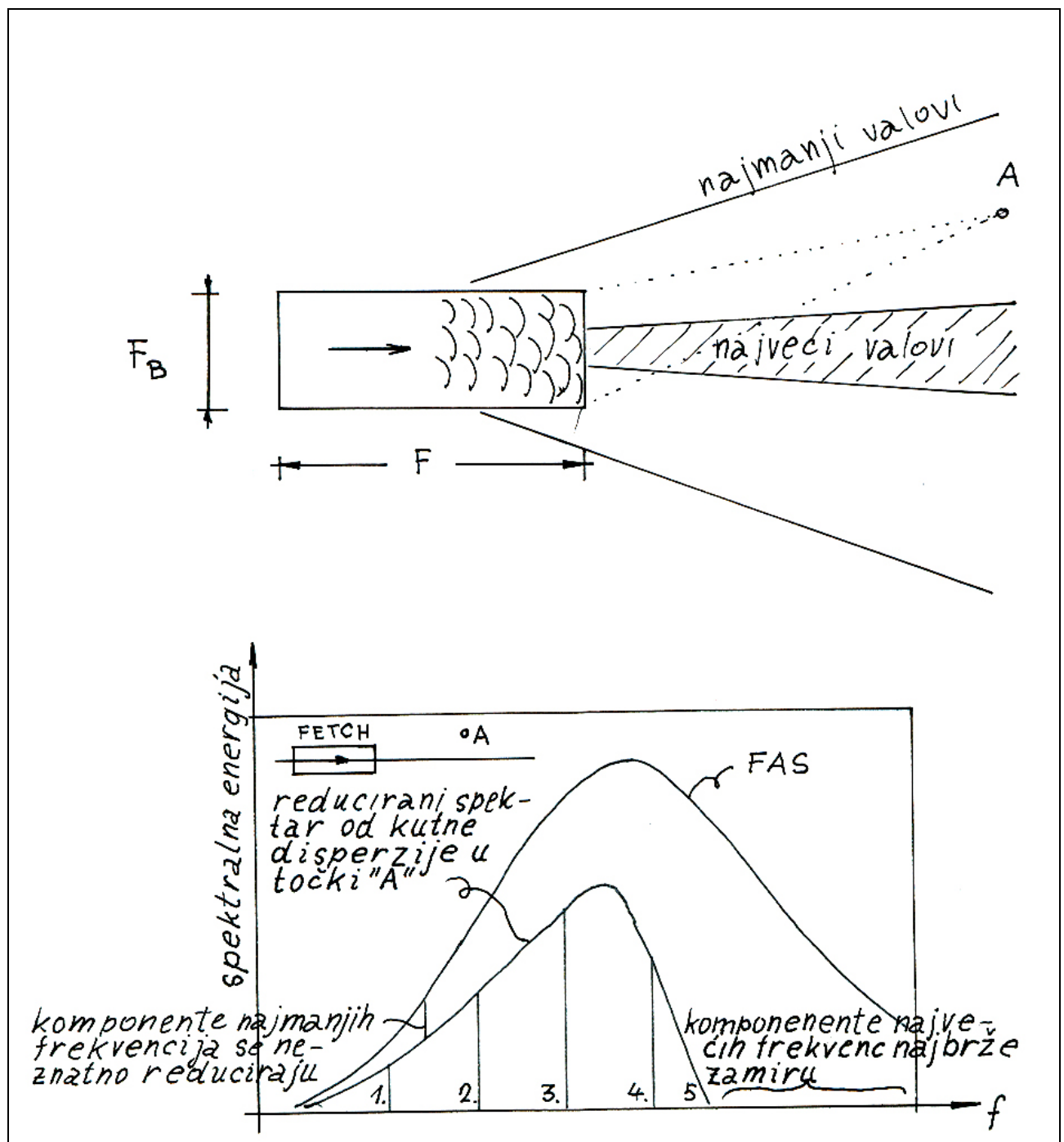
Sada se mogu nabrojiti osnovne karakteristike valova mrtvog mora na nekoj udaljenoj točki od privjetrišta:

- dugovalno polje,
- stabilan profil vala sinusoidalni za blaže i trohoidalni za strmije tipove,
- sukcesivno pristizanje najprije najdužih („vjesnici oluje“), a na koncu najkraćih valova,
- mnogo duže traju nego li traje oluja (nasuprot tome v. ž. m. traju koliko i oluja),
- rasprostiranje praktički bez gubitka energije.

Valovi živog mora imaju veliku koncentraciju energije na jediničnu morsku površinu i rasprostiru se radijalno od svog centra visokog intenziteta, te isto tako izlaze van privjetrišta. Ako se promatra valno polje mrtvog mora nakon privjetrišta valovi će se tamo rasprostirati u širokoj lepezi smjerova ($\pm 90^\circ$). U centru lepeze su najveći, a na rubovima najmanji valovi. Isto tako što je dalje od izvora visina valova opada. Taj se proces naziva kutna i radijalna disperzija Sl. 3.1.1.4::1.

Na nekoj točki A van privjetrišta (gdje se vrši valni zapis) svi valovi koji dolaze sadržani su u uskoj lepezi smjerova, a centralni valovi koji dopremaju najviše energije mimoilaze točku A. Rezultat je restrikcija energije koja biva dopremljena u tu točku: kutna disperzija. Njena je posljedica smanjenje valnih visina (manja površina spektra) i dugovalnije valno polje, jer sasvim mali i kratki valovi odu na rubove lepeze i zamiru. Također postoji i radijalna disperzija: najduži valovi (najvećih perioda), najbrže dosižu točku A, srednji ih slijede, a najkraći su zadnji tako da porcije energije stižu sukcesivno Time se „vršna“ frekvencija

spektra pomiče ulijevo, tj. u područje manjih frekvencija, odnosno u područje većih perioda, a time i većih valnih dužina.



Slika 3.1.1.4::1 Redukcija valnog spektra uslijed kutne i radialne disperzije

Unutar privjetrišta može, u vrijeme generiranja valova od vjetrova, biti valova mrtvog mora od neke prethodne oluje. Pošto su generirani od udaljene oluje, ti valovi će u razmatrano privjetrište stići oslabljeni uslijed disperzije i trenja. Atenuacija valne visine i valnog perioda

nakon što valovi napuste privjetrište dana je na sljedećem dijagramu sa Slike 3.1.1.4::2. Sumarna valna visina (od vjetra i mrtvog mora) je:

$$H = \sqrt{H_{\text{mrtvog mora}}^2 + H_{\text{od vjetra}}^2}$$

CERC I, str 3-44, sl 3-19

Slika 3.1.1.4::2 Krivulje zamiranja valova, Bretschneider 1952.

3.1.1.5 Statističko-vjerojatnosni opis vjetrovnih valova

Ovaj opis ne daje kompletnu sliku valovanja jer se odnosi samo na profil vala, a ne na gibanje vodnih čestica. Ideja je da se statističkom obradom svih pojedinačnih valova tokom nekog kratkoročnog stacionarnog stanja mora trajanja 5-15 minuta; tj. obradom pripadnog valnog zapisa dobiju reprezentativni parametri valnog profila koji se dalje uvrste u izraze za deterministički opis valova i s takvim reprezentativnim pravilnim valovima se tretiraju građevinske konstrukcije.

Reprezentativni valni parametri za kratkoročno stacionarno stanje mora trajanja 5-15 minuta su:

H_{max} [m]	maksimalna valna visina koju dosegne neki val u jednom valnom zapisu
----------------------	--

$H_{1/10} = \frac{1}{N_0/10} \sum_{i=1}^{N_0/10} H_i^{\text{opad.niza}}$ desetinska valna visina [m]; prosjek od 1/10 najviših valnih visina u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova

$H_{1/3} \equiv H_S = \frac{1}{N_0/3} \sum_{i=1}^{N_0/3} H_i^{\text{opad.niza}}$ značajna valna visina [m]; prosjek od 1/3 najviših valnih visina u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova

$H_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2}$ korijen sredine kvadrata svih valnih visina u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova; energetski reprezentant realnog (nepravilnog) valnog polja

$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i$ [m] prosječna valna visina; prosjek od svih valnih visina u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova

T_{max} [s] maksimalni valni period koji ima neki val u jednom valnom zapisu

$T_{1/10} = \frac{1}{N_0/10} \sum_{i=1}^{N_0/10} T_0(H_i^{\text{opad.niza}})$ desetinski valni period [s]; prosjek od 1/10 valnih perioda koji pripadaju 1/10 najviših valova, u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova

$T_S \equiv T_{1/3} = \frac{1}{N_0/3} \sum_{i=1}^{N_0/3} T_0(H_i^{\text{opad.niza}})$ značajni valni period [s]; prosjek od 1/3 valnih perioda, koji pripadaju 1/3 najviših valova, u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova

$\bar{T} \equiv \bar{T}_0 = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_{0i} = \frac{T_R}{N_0}$ [s] prosječni valni period presijecanja nule; prosjek od svih valnih perioda, u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova,

gdje je:

N_0 broj uzlaznih ili silaznih presijecanja nule u jednom valnom zapisu t.j. broj valova

$H_i^{\text{opad.niza}}$ [m] i-ta valna visina iz niza valnih visina pojedinačnih valova u jednom valnom zapisu složenom po opadanju

H_i [m]	i-ta valna visina iz sukcesivnog niza valnih visina pojedinačnih valova u jednom valnom zapisu
$T_{0,i}$ [s]	i-ti valni period presijecanja nule iz sukcesivnog niza perioda presijecanja nule pojedinačnih valova u jednom valnom zapisu
$T_0(H_i^{\text{opad. niza}})$ [s]	period presijecanja nule koji pripada valnoj visini $H_i^{\text{opad. niza}}$
T_R [s]	dužina jednog valnog zapisa u kojem ima N_0 valova ili vrijeme registracije valova

Svim parametrima obično se pridružuje smjer dolaska valova.

Obzirom na to da Rayleigh-ova distribucija vjerojatnosti pojedinačnih valnih visina vrijedi za svako kratkoročno stacionarno stanje mora, mogu se općenito definirati odnosi reprezentativnih valnih visina:

$$H_{\max} \approx H_{1/1000} \approx 2H_S = 2,82 H_{\text{rms}} = 3,25 \bar{H} \quad T_{\max} \approx T_S \approx 1,1 \bar{T}_0$$

$$H_{1/100} = 1,67 H_S = 2,36 H_{\text{rms}} = 2,73 \bar{H}$$

$$H_{1/10} = 1,27 H_S = 1,8 H_{\text{rms}} = 2,17 \bar{H} \quad T_S \approx 1,1 \bar{T}_0$$

$$H_{1/3} = H_S = \sqrt{2} H_{\text{rms}} = 1,63 \bar{H}$$

$$H_{\text{rms}} = \frac{\sqrt{2}}{2} H_S = 1,15 \bar{H}$$

$$\bar{H} = 0,61 H_S$$

$$\bar{T}_0 = 0,9 T_S$$

Za valne periode vezane uz reprezentativne valne visine vrijede gornji empirijski odnosi. Distribucija vjerojatnosti kvadrata valnih perioda pojedinačnih valova je također Rayleigh-ova.

Reprezentativni valni parametri za dugoročno vremensko razdoblje su:

H_S^{PR} [m]	značajna valna visina povratnog razdoblja od PR=1,5,10,20,50,100 godina; tj. značajna valna visina koja u PR godina može biti 1x dostignuta ili premašena
-----------------------	---

T_S^{PR} značajni valni period povratnog razdoblja od $PR=1,5,10,20,50,100\dots$ godina,

i ostali analogni valni parametri iz kratkoročnog stanja mora s pridruženim povratnim periodima. Na pr. H_{max}^{100g} , $H_{1/10}^{5g}$, $\bar{T}_0^{25}$ Značajna valna visina H_s^{PR} povratnog razdoblja od $PR = 10, 20, 50, 100$ godina se izračuna iz višegodišnjeg niza ekstrema značajnih valnih visina (na pr. po jedan ekstrem godišnje) kao ona valna visina koja u povratnom razdoblju od PR godina može biti 1 puta dostignuta ili premašena. Iz nje se, prema gornjim odnosima reprezentativnih valnih visina, izvode H_{max}^{PR} , $H_{1/10}^{PR}$ i $\bar{H}^{PR}$. Isto vrijedi i za valne periode. Značajni valni period T_s^{PR} povratnog razdoblja od $PR = 1, 10, 20, 50, 100$ godina se dobije iz višegodišnjeg niza značajnih valnih perioda kao onaj valni period koji u povratnom razdoblju od PR godina može biti 1 puta dostignut ili premašen. Iz njega se izvodi T_{max}^{PR} i $\bar{T}_0^{PR}$.

3.1.1.6 Prognoze realnih valova

Valna prognoza se ovdje definira kao postupak određivanja statistički reprezentativnih ili vjerojatnih parametara valnog profila realnih valova, ili valnog spektra pomaka fizičke površine mora. Prognoziranim veličinama pridružuje se smjer rasprostiranja. Temelj za to su izmjerena stanja morske površine, ili podaci potrebni za definiranje valnog generativnog procesa (na pr. vjetar) koji opet mogu biti izmjereni ili, prognozirani. Parametri gibanja vodnih čestica se ne prognoziraju. Oni se određuju temeljem zavisnosti gibanja vodnih čestica i prognoziranih parametara valnog profila primjenom teorija idealnog vala, ili adekvatnih zavisnosti valnog spektra pomaka i spektara gibanja vodnih čestica.

Metode prognoza površinskih morskih valova su logično specificirane **prema valnim generatorima** na:

- prognoze vjetrovnih valova,
- prognoze valova od uragana,
- prognoze plimnih valova,
- prognoze baričkih valova (storm surge),
- prognoze valova od potresa (cunami).....

Prema točnosti sve valne prognoze mogu se podijeliti na:

- **kvalitativne** i
- **kvantitativne**.

Kvalitativne određuju stanje mora stupnjevima koji su opisni i orijentacijski. Opis uključuje dosta širok raspon valnih parametara koji su mogući kod tog stanja mora. Služe za navigaciju. *Kvantitativne* prognoze određuju stanje mora brojčanom vrijednošću nekog, ili više valnih parametara. Služe za inženjerske svrhe.

Obzirom na veličine koje prognoziraju sve vrste prognoza realnih valova teoretski mogu biti:

- **statističko-vjerojatnosne (nazivi su još stohastičke ili probabilističke) koje mogu biti**
 - kratkoročne
 - dugoročne, i
- **vremenske valne prognoze koje su**
 - kratkoročne.

Pri tome se *statističko-vjerojatnosnim prognozama* utvrđuju statistički reprezentativni valni parametri odnosno valni spektri, ili se njima utvrđuju vjerojatnosti dostizanja odnosno premašenja nekog valnog parametra ili spektra. Primjenjuju se u graditeljstvu, naročito za vjetrovne valove. Ovakva prognoza može biti **kratkoročna i dugoročna**. *Kratkoročna* se odnosi na stanje mora trajanja 10-tak minuta do nekoliko dana, a *dugoročna* na rijetke pojave u dužem nizu godina. *Vremenskim prognozama* se utvrđuju veličina i vrijeme nastupa mekog valnog parametra. Njihova točnost odgovara točnosti klimatskih prognoza. One su kratkoročne.

Valne prognoze, po nastupu, mogu biti:

- **vjerojatnosne i**
- **vremenske.**

Vjerojatnosne definiraju vjerojatnost nastupa neke valne veličine, a *vremenske* i vrijeme njenog nastupa.

Valne prognoze, prema geografskoj pripadnosti, su:

- **regionalne i**
- **lokalne.**

Regionalne su ranije bile manje-više kvalitativne i služile za navigaciju, a u novije vrijeme razvijene su pouzdane kvantitativne regionalne valne prognoze. Treba napomenuti da su danas u funkciji regionalne vremenske prognoze vjetrovnih valova na pr. WAM model (Wave Model ili Wave Analysis Model) na pr.: ECMWF model (srednjeeuropski meteorološki centar) za Mediteran uključivo Jadran. *Lokalne* su isključivo kvantitativne. Načinjene su za neku geografsku točku, ili uže područje, a služe u inženjerske svrhe.

U nastavku će se izučavati samo valne prognoze vjetrovnih valova zbog najvećeg djelovanja na pomorske građevine.

3.1.1.6.1 Prognoze površinskih vjetrovnih morskih valova

Povijest **kratkoročnih prognoza** vjetrovnih valova može se podijeliti na tri ere:

- **I. era** statističko-vjerojatnosnih metoda za kratkoročne lokalne prognoze statistički reprezentativnih i vjerojatnosnih valnih parametara. Vjerojatnosni su izvedeni iz reprezentativnih na konceptu značajnih valnih parametara. Metode su bile utemeljene empirijski i poluempirijski.
- **II. era** statističko-vjerojatnosnih metoda za kratkoročne lokalne prognoze statistički reprezentativnih i vjerojatnosnih valnih parametara, ili valnih spektara. Vjerojatnosni valni parametri su izvedeni iz reprezentativnih na konceptu značajnih valnih parametara.. Metode su bile utemeljene poluteorijski.
- **III.**, još uvijek aktualnu, **eru** numeričkih regionalnih vremenskih modela za neko šire geografsko područje na kojem se definira veličina i vrijeme nastupa reprezentativnih valnih parametara.

Dugoročne vjerojatnosne valne prognoze se baziraju na rezultatima velikog broja kratkoročnih prognoza, a praktično se rade za razdoblja **1 godine do stoljeća**.

Za potrebe pomorskog graditeljstva najinteresantnije su prognoze vjetrovnih valova, jer su to valovi najveće energije i stoga imaju najveća djelovanja na građevine. Rezultat prognoze su reprezentativni parametri valnog profila, ili valni spektar, realnih valova. Inženjerski se najčešće koriste prognoze vjetrovnih valova koje su: a) istovremeno kvantitativne, statističko-vjerojatnosne, lokalne i kratkoročne ili b) istovremeno kvantitativne, statističko-vjerojatnosne, lokalne i dugoročne. Ove pod a) će se u nastavku nazivati: kratkoročne prognoze vjetrovnih valova, a one pod b) dugoročne prognoze vjetrovnih valova.

		TEMELJEM PODATAKA O VALOVIMA		TEMELJEM PODATAKA O VJETRU	
KRA TKOROČNE PROGNOZE	potrebni podaci	vizualno osmatranje pojedinačnog stanja mora	instrumentalni valni zapis pojedinačnog stanja mora	vizualno osmatranje pojedinačnog stanja vjetra	instrumenalni anemografski zapis pojedinačnog stanja vjetra
	prognozirane veličine	kratkoročni reprezentativni valni parametri ili teorijski valni spektar za pojedinačno stanje mora	kratkoročni reprezentativni valni parametri ili empirijski valni spektar za pojedinačno stanje mora	kratkoročni reprezentativni valni parametri ili teorijski valni spektar za pojedinačno stanje mora	kratkoročni reprezentativni valni parametri ili teorijski valni spektar za pojedinačno stanje mora

DUGOROČNE PROGNOZE	potrebni podaci	reprezentativni valni parametri temeljem mnogo valnih situacija iz višegodišnjeg vizualnog ili instrumentalnog opažanja	dugoročni reprezentativni valni parametri za stanja mora koja se rijetko javljaju; t.j. koja se javljaju u dugim povratnim razdobljima	reprezentativni valni parametri temeljem mnogo situacija vjetra iz višegodišnjeg vizualnog ili instrumentalnog opažanja	dugoročni reprezentativni valni parametri za stanja mora koja se rijetko javljaju; t.j. koja se javljaju u dugim povratnim razdobljima
	prognozirane veličine	dugoročni reprezentativni valni parametri za stanja mora koja se rijetko javljaju; t.j. koja se javljaju u dugim povratnim razdobljima	dugoročni teorijski spektri za stanja mora koja se rijetko javljaju; t.j. koja se javljaju u dugim povratnim razdobljima	dugoročni reprezentativni valni parametri za stanja mora koja se rijetko javljaju; t.j. koja se javljaju u dugim povratnim razdobljima	dugoročni teorijski spektri za stanja mora koja se rijetko javljaju; t.j. koja se javljaju u dugim povratnim razdobljima

Tab. 3.1.1.6.1::I Pregled prognoziranih veličina kod kratkoročnih i dugoročnih prognoza vjetrovnih valova u funkciji ulaznih podataka

Prognoze vjetrovnih valova mogu se vršiti na temelju podataka o vjetru ili podataka o valovima. Jasno je da su kvalitetnije prognoze na temelju podataka o valovima, pa se zato prognoze temeljem vjetra rabe kad nema podataka o valovima (što je nažalost gotovo pravilo). Isto tako opažanja vjetra i valova mogu se obavljati vizualno i instrumentalno. Jasno je da su kvalitetnije prognoze na temelju instrumentalnih opažanja. Za kratkoročnu prognozu potrebni su podaci samo od jednog stanja valova ili vjetra, a za dugoročnu višegodišnji niz valnih situacija ili situacija vjetra. Izlazni podaci kratkoročnih i dugoročnih prognoza vjetrovnih valova u funkciji raspoloživih podataka dani su u Tablici 3.1.1.6.1::I.

3.1.1.6.1.1 Podaci potrebni za prognoze vjetrovnih valova

Ovakve prognoze mogu se raditi na temelju podataka o vjetru ili podataka o valovima. Za kratkoročne prognoze potrebni su podaci od jednog ili nekoliko pojedinačnih stanja mora unutar jedne valne ili vjetrovne situacije, a za dugoročnu podaci od velikog broja situacija vjetra ili valova iz 30-godišnjeg, ili barem 10-godišnjeg, razdoblja opažanja.

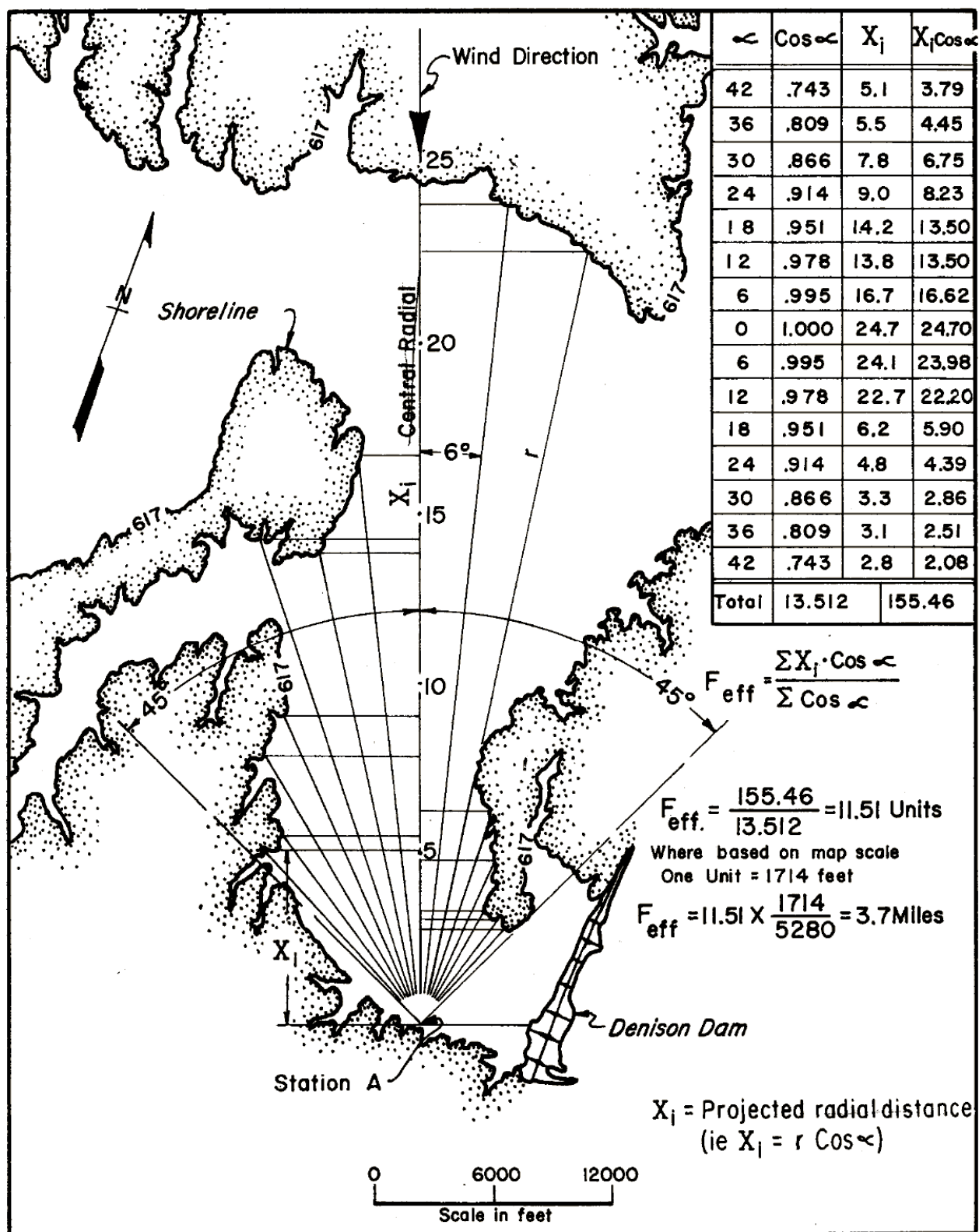
Projektna brzina vjetra za valne prognoze je srednja satna brzina vjetra $\overline{U_{3600}(z_m)}$ [m/s] na $z_m=10$ [m] iznad mora što je logično jer je standardni 10-minutni srednjak prekratak: t.j. karakteristična brzina vjetra $\overline{U(z_m)}=\overline{U_{600}(z_m)}$ prekratka za valni generativni proces koji se razvija satima. Ako je poznata karakteristična brzina vjetra $\overline{U(z_m)}$ [m/s] (10-minutni srednjak na $z_m=10$ [m] iznad mora) onda se satni srednjak prema Sl. 3.1.1.6.1.1::1

izračuna kao $\overline{U_{3600s}(z_m)} = C_{600}^G(z_m, 3600[s]) \cdot \overline{U_{600s}(z_m)}$, ili konkretno otprilike $U_{3600[s]}(z_m) = 0,95 \cdot \overline{U_{600[s]}(z_m)}$.

Osnovni podaci za prognoziranje valova iz podataka o vjetru su smjer, srednja satna brzina $\overline{U_{3600[s]}(z_m)}$ [m/s] i trajanje vjetra $t[h]$, te privjetrište $F[km]$ i dubina mora $d[m]$. Informacije o interesantnim smjerovima, brzini i učestalosti vjetra daje ruža vjetrova tj. iz nje se uočava generalna slika vjetrovne klime, što je u grubo i slika valne klime. No ruža, osim smjerova i redovnih brzina, ne sadrži ostale potrebne podatke o vjetru za kvantitativnu valnu prognozu kao što su brzine i njihova pripadna trajanja tokom cijele situacije vjetra unutar nekoliko sati do nekoliko dana. Maksimalne brzine dešavaju se vrlo rijetko, pa im učestalost iznosi djeliće postotka i stoga se na ruži, ili uprosječnoj tablici kontigencije, ne vide. Zbog toga, za valnu prognozu, treba kod meteorološkog zavoda naručiti detaljnije podatke o situacijama vjetra (t.j brzine i pripadna trajanja vjetra) kroz 10-30 godišnje razdoblje što ne daje ruža vjetrova; . Za kratkoročnu prognozu treba naručiti konkretnu situaciju vjetra od interesa (od početka puhanja do smirenja). Takva se prognoza rijetko radi; na pr. kod analiziranja havarije neke postojeće pomorske građevine od konkretne oluje. Za dugoročnu prognozu, koja se radi kod svakog projekta nove pomorske građevine, treba iz prethodnog 30-godišnjeg ili barem 10-godišnjeg razdoblja opažanja naručiti: a) tablicu kontigencije s apsolutnim učestalostima i b) sve situacije vjetra (od početka puhanja do smirenja) jačine iznad 3-4Bf unutar kuta izloženosti valovima razmatrane lokacije za pomorsku građevinu.

Za kratkoročnu prognozu uzimaju se podaci o **satnim brzimama** $\overline{U_{3600[s]}(z_m)}$ [m/s] i pripadajućim **trajanjima** $t[h]$ vjetra za cijelu meteorološku situaciju od interesa ako se nastoji prognozirati stanje mora u bilo kojem trenutku te situacije. Pri tome treba imati na umu da svaka situacija vjetra ima faze porasta, vrhunca i opadanja brzine vjetra s vremenom. Za prognoze ekstremnog stanja mora u razmatranoj situaciji vjetra interesantne su faze porasta, vrhunca i opadanja. Ako se umjesto kontinuirane zvonolike funkcije promjene brzine vjetra s vremenom zamisli diskretna stepenasta funkcija onda svaka stepenica predstavlja jedno stanje vjetra koje se sastoji od para: brzina i pripadajuće trajanja vjetra. Takvih stepenica je velik broj, a time nastaje i velik broj parova: brzina i trajanja vjetra. Kako se prognoza može vršiti samo za jedan par podataka o vjetru (brzina i trajanje) to je, za onaj trenutak kada se želi doznati stanje mora; t.j. izvršiti valna prognoza, potrebno uzeti brzinu vjetra u tom trenutku iz podataka mjerenja, i njoj pridružiti ekvivalentno trajanje vjetra. Izračunavanje ekvivalentnog trajanja vjetra vrši se sumiranjem ekvivalentnih trajanja za pojedine parove (brzina i trajanje), kod brzina vjetra prije one u trenutku prognožiranja, po principu da se za svaki takav par podataka nađe ekvivalentno (kraće) trajanje koje s brzinom u trenutku prognožiranja daje istu valnu visinu kao i dotični par podataka. Taj proračun se može provesti na bilo kojem poluempirijskom prognostičkom dijagramu.

Privjetrište $F[km]$ (engl. Fetch) je morska površina iznad koje puše vjetar generirajući valove (Sl. 3.1.1.6.1.1::2). Za priobalne lokacije i zaljeve privjetrište se proteže preko cijelog akvatorija, jer se smatra da polje vjetra uvijek pokriva cijeli akvatorij.

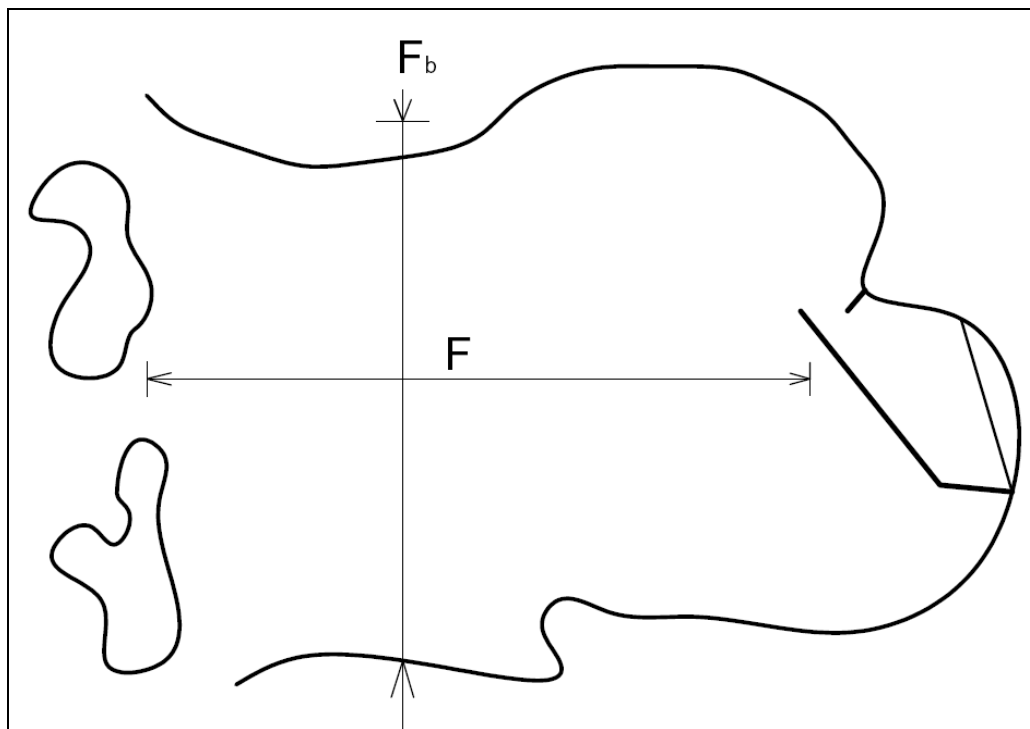


(U.S. Army, B.E.B. Tech. Memo No. 132, 1962)

Sl. 3.1.1.6.1.1::3

Definicijska skica za proračun efektivnog privjetrišta, [1] CERC 1984.

Kod približno pravokutnih akvatorija, prema Sl. 3.1.1.6.1.1::2 dimenzije privjetrišta su: duljina privjetrišta F [km] i širina privjetrišta F_b [km]. U slučaju širokih privjetrišta: $F_b \leq (1/2)F$ mjerodavna je samo duljina privjetrišta. Za uska privjetrišta: $F_b > (1/2)F$ mjerodavne su duljina i širina iz kojih se izračunava samo jedan podatak t.zv. "efektivno privjetrište". Ono se određuje preko teoretski izvedenih dijagrama, a kod nepravilnih pomoću geometrijske konstrukcije (Sl. 3.1.1.6.1.1::3) prema priručniku [1] (CERC I, Shore Protection Manual, Coastal Engineering Research Center, 1984.



Sl. 3.1.1.6.1.1::2 Definijska skica za dimenzije privjetrišta

U koliko vjetar puše nad oceanom čija je površina veća od područja zahvaćenog vjetrom privjetrište se određuje specijalnom metodom prema priručniku World Meteorological Organization WMO [2]. Isto se može naći i u priručniku [1] CERC.

Dubina mora ne ulazi u proceduru prognoze, kao ulazni podatak, ako je more "duboko" za prognozirane valove; inače ulazi. Kako se to ne može znati unaprijed prognoza se provodi u vidu iteracije.

3.1.1.6.2 Lokalne kratkoročne prognoze vjetrovnih valova

Odnose se na pojedinačne valne situacije koje mogu trajati nekoliko sati do nekoliko dana. Rezultat prognoze je prikaz valovlja u bilo kojem "trenutku" razmatrane situacije od njenog početka, pa do kraja. Taj "trenutak" je u stvari vremenski interval u kojem se valni proces može smatrati stacionaran, i on je standardiziran na cca 10-minuta. Ovim prognozama utvrđuju se statistički reprezentativni valni parametri, ili valni spektar, na jednoj geografskoj točki za neko *kratkoročno stacionarno*

stanje mora trajanja 10-tak minuta i to u statističkoj formi preko reprezentativnih parametara valnog profila:

- značajne valne visine $H_s \equiv H_{1/3}$ i
- značajnog valnog perioda $T_s \equiv T_{1/3}$ (ili $\bar{T}_0$),

ili u spektralnoj formi u vidu

- valnog spektra izdizanja (pomaka) fizičke površine mora $S_{\eta\eta}(f)$.

3.1.1.6.2.1 Lokalne kratkoročne prognoze reprezentativnih parametara valnog profila iz podataka o vjetru

Rezultat ovakve prognoze su reprezentativni valni parametri: najčešće značajna valna visina H_s i značajni valni period T_s za *kratkoročno stacionarno stanje mora trajanja 10-tak minuta*. Ovakve prognoze se provode kad nema podataka o valovima. Mogu se raditi za prošlost, sadašnjost, i budućnost ako su poznati podaci o vjetru iz prošlosti, iz sadašnjosti, odnosno ako su prognozirani za budućnost. Ove prognoze pripadaju u **I. i II. eru valnih prognoza**.

U **I. eri** postoje dvije generacije metoda: empirijske i poluempirijske. Obadviije grupe za provedbu valne prognoze trebaju neke podatke ili sve podatke o vjetru definirane u poglavlju 3.1.1.6.1. **Empirijske formule** su razvijane između sredine XIX. i sredine XX. stoljeća, , no nakon II svjetskog rata su prevaziđene poluempirijskim metodama.

Počak **I 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 **empirijskim** izrazom $H_{\max} = \sqrt{F}/3$, gdje je H visina u metrima, a F duljina privjetrišta u kilometrima.

$$\text{Pr. } F = 300\text{km} \rightarrow H_{\max} = \sqrt{F}/3 = \sqrt{300}/3 = 5,77\text{m}$$

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, U , a koristi se još i danas $H_{\max} = 0,3U^2 / g$.

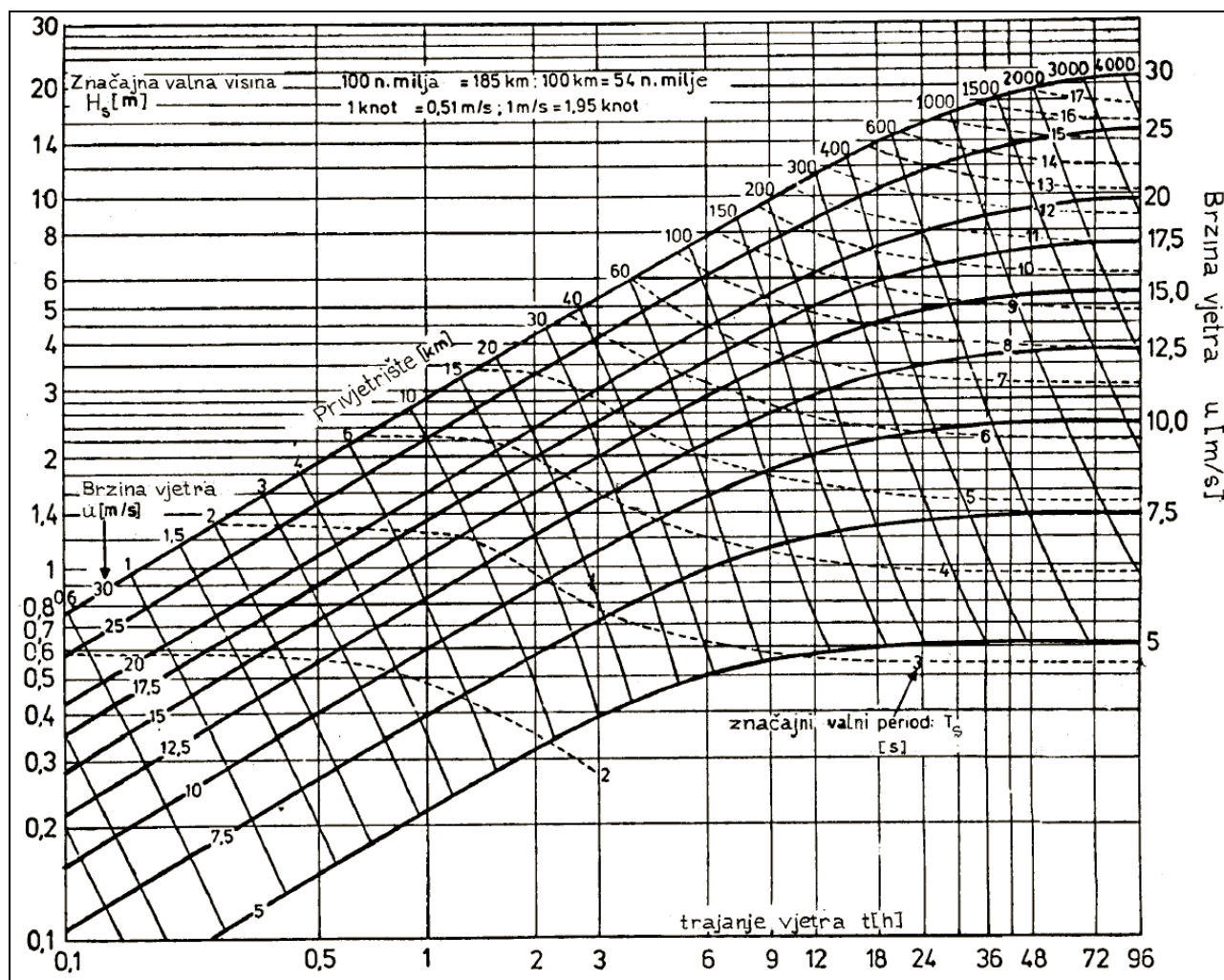
$$\text{Pr. } U = 15\text{m/s} \rightarrow H_{\max} = 0,3 \cdot 15^2 / 9,81 = 6,88\text{m}$$

Kod **poluempirijskih metoda** su zakonitosti generativnog procesa izvedene teorijskim analizama (dimenzionalnim, statističkim,...), a veličine njihovih parametara su dobivene iz mnogih opažanja stanja mora i relevantnih meteoroloških značajki okoliša. 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. Bretschneider (1952, 1958) je proširio njihova nastojanja dodatnim podacima i razvio općepoznatu SMB metodu. Radi se o "metodi značajnih valnih parametara", gdje pripadaju:

- SMB metoda (Sverdrup, Munk, Bretschneider) Sl. 3.1.1.6.2.1::1 [3],

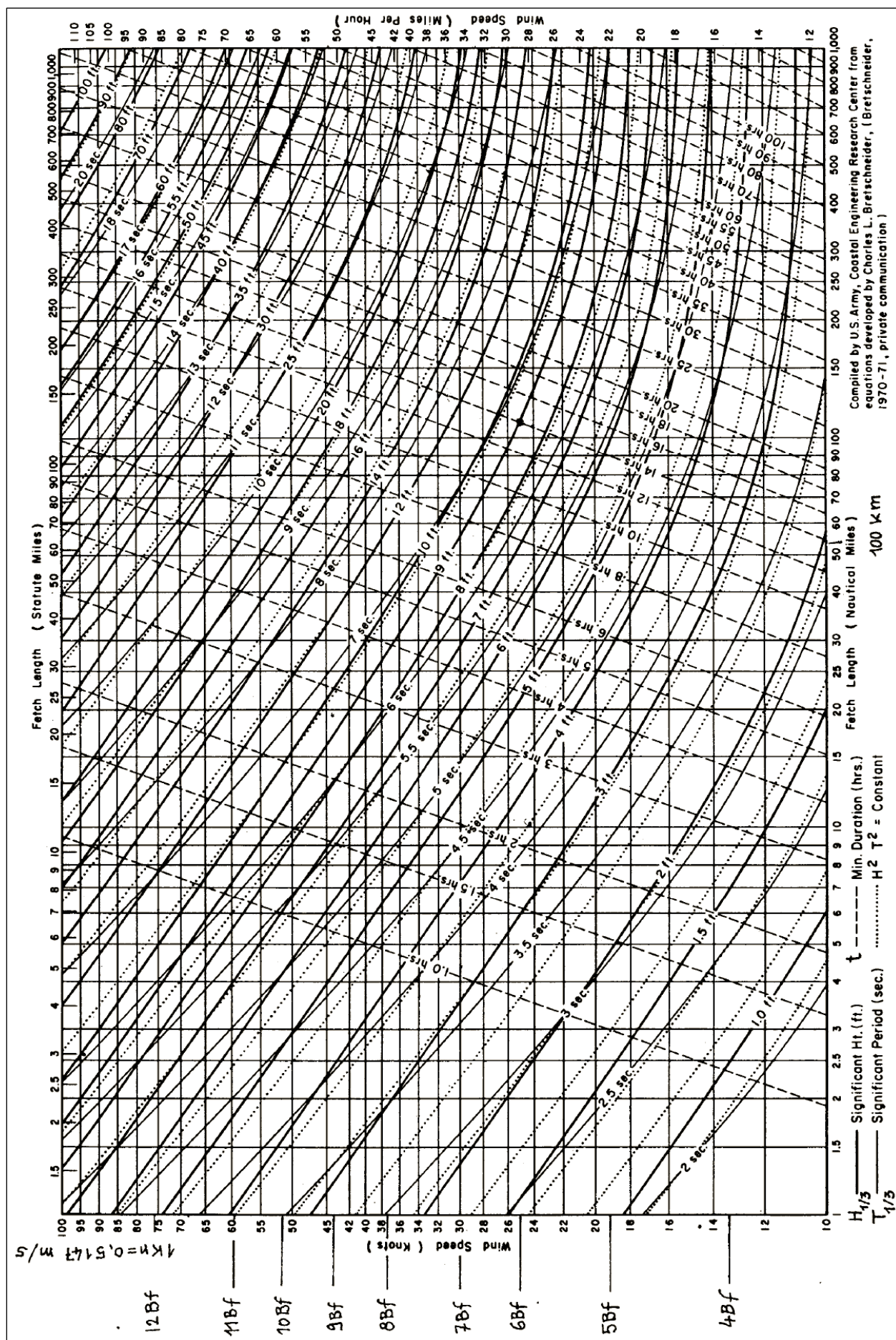
- Groen - Dorrenstein metoda Sl. 3.1.1.6.2.1::2 [5] i druge kao [4] i [6]

Ovim metodama ne mogu se prognozirati valni spektri. Uglavnom su dane za duboko more. Postoje i metode za **plitko more i jezera** za što postoje posebni (na pr. SMB)dijagrami [1], a i mnoge druge metode.



Sl. 3.1.1.6.2.1::2 Groen - Dorrenstein dijagram za prognozu dubokovodnog značajnog vala u funkciji brzine i trajanja vjetra, te privjetrišta [2]

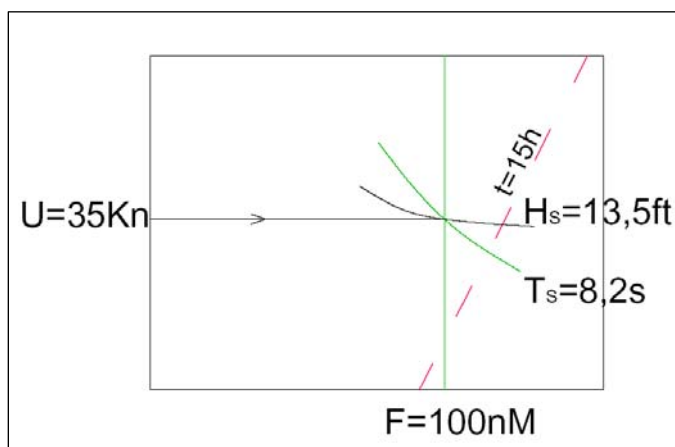
Sve navedene (i mnogobrojne druge) metode izvedene su u vidu matematičkih izraza, ali su za praktične svrhe dane na dijagramima. Prikazati će se SMB metoda (Sl. 3.1.1.6.2.1::1) kao najpoznatija i Groen-Dorrenstein (Sl. 3.1.1.6.2.1::2) preporučena od WMO [2]. Sve one se u pravilu koriste tako da se s lijeva na desno prati konstantna brzina vjetra u i zatim traži njeno presjecište s privjetrištem F ili trajanjem vjetra t koje već prvo dođe. Na mjestu tog prvog presjecišta očitaju se prognozirana značajna valna visina H_s i značajni valni period T_s . Presjecište brzine vjetra s privjetrištem ili trajanjem pokazuje koji od ta dva uticajna faktora je ograničavajući za generiranje vjetrovnih valova.



Sl. 1.3.1.1.6.2.1:1 SMB dijagram za prognozu dubokovodnog značajnog vala u funkciji brzine, trajanja vjetra i privjetrišta:
 $1[Nm]=1853[m]$, $1[čvor]=1[Nm/h]=0.5147[m/s]$ [1] CERC

Sasvim desno na dijagramima se uočava da prognozirane veličine H_s (ili $H_{\max}$) i T_s postaju neovisne od privjetrišta i trajanja vjetra, a ovise samo od brzine vjetra u . Takvo stanje valnog generativnog procesa naziva se potpuno razvijeno more (engl.: Fully Arisen Sea-FAS). Privjetrište i trajanje vjetra tada nisu ograničavajući faktori, i na valove se prenosi najveća moguća energija vjetra.

Primjer 3.1.1.6.2.1::1 *Prognoza vala SMB metodom za slučaj kada je mjerodavno privjetrište*



Zadano: $U=35[\text{čv}\equiv\text{Kn}]=18[\text{m/s}]$ srednja satna brzina vjetra

$t = 15 [\text{h}]$

trajanje vjetra

$F=100[\text{nM}]=185,3\text{km}$

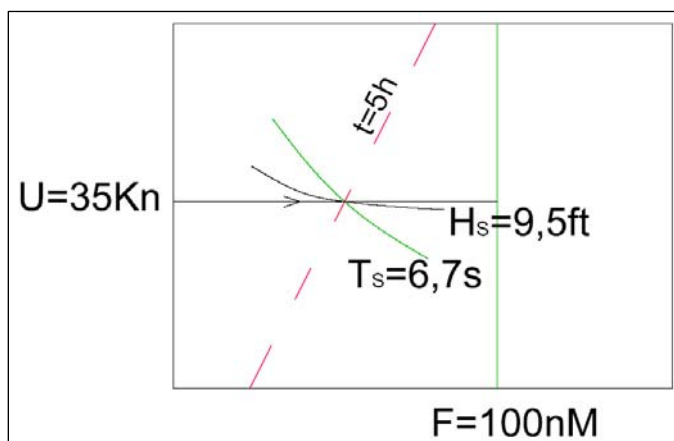
dužina privjetrišta

Rezultat: Na mjestu presjecišta U i F očita se:

$$H_{1/3} = 13,5[\text{ft}] = 13,5 \times 0,305 \approx 4 [\text{m}]$$

$$T_{1/3} = 8,2 [\text{s}]$$

Primjer 3.1.1.6.2.1::2 *Prognoza vala SMB metodom za slučaj kada je mjerodavno trajanje vjetra*



Zadano: $U=35[\text{čv}\equiv\text{Kn}]=18[\text{m/s}]$ srednja satna brzina vjetra

$t = 5 [\text{h}]$

trajanje vjetra

$F=100[\text{nM}]=185,3\text{km}$

dužina privjetrišta

Rezultat: Na mjestu presjecišta U i t očita se:

$$H_{1/3} = 9,5 [\text{ft}] = 2,9 \times 0,305 \approx 2,9 [\text{m}]$$

$$T_{1/3} = 6,7 [\text{s}]$$

II. era započela je uvođenjem spektralne analize u proučavanje valova ranih 50-tih i formuliranjem Neumannovog spektra. Pierson i dr. 1955 razvijaju prognozu valova temeljenu na spektralnoj analizi, PNJ (Pierson, Neumann i James) metodu. Obje metode baziraju se na dijagramima i prognoza se obavlja ručno. Mogu se prognozirati značajni valni parametri, ali i valni spektri! Najcitiranije su:

- PNJ metoda (Pierson, Neuman, James) [7] i
- JONSWAP metoda (Joint North Sea Wave Project) [8].

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

III. era započela je konačnim okvirom za numeričko modeliranje valova generiranih vjetrom koji je postavio je Hasselmann (1963) kada je postavio jednadžbu energetske ravnoteže valnog spektra, koja predstavlja bazu moguće točne teorije dinamike valnog spektra u obliku

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

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. Predstavnicima 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.).

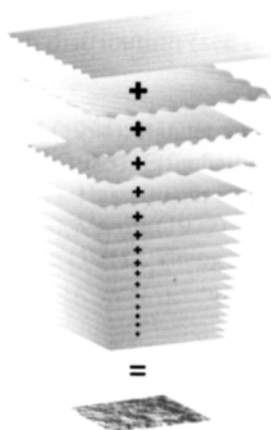
U svim navedenim modelima, postoje i druga ograničenja za primjenu u obalnim područjima, i to:

- 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 morskih struja i promjenjivu dubinu, generiranje valova vjetrom, nelinearna 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. Također za primjenu u obalnom području razvijen je i numerički model MIKE 21/SW (DHI, 2009.) koji koristi iste procesne jednadžbe kao i SWAN.

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 (Sl. 1.3.1.1.6.2.1::2). Budući je energija spektra promjenjiva u vremenu, t i prostoru, (x, y) , korektan je zapis u obliku $E(f, \theta) = E(f, \theta; x, y, t)$.



Sl. 1.3.1.1.6.2.1::2 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:

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

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

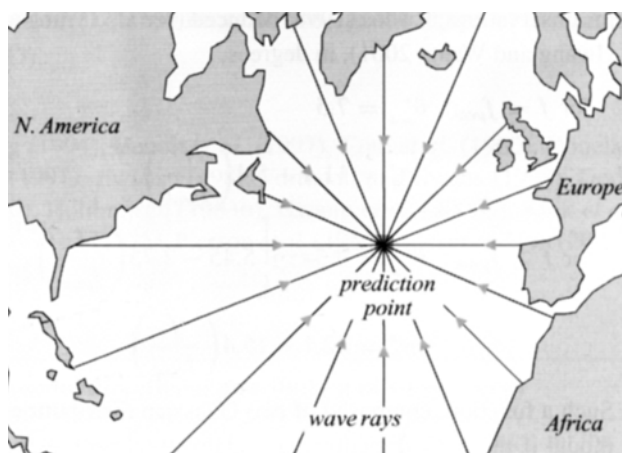
u sustav dolazi od vjetra, S_{nl} opisuje nelinearni prijenos energije između samih valova (ovisno o području u kojem se nalazi uzima se u obzir *quadruplet* ili *triada*), S_{ds} disipaciju energije uslijed površinskog loma valova, S_{bot} disipaciju energije uslijed trenja s dnom i S_{surf} disipaciju valne energije uslijed loma valova uzrokovano promjenom dubine.

Širenje valova, opisano lijevom stranom jednadžbe 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 iredularnosti morskih valova.

Konceptualno gledano, gornjim izrazom 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 gornju jednadžbu 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 1.3.1.1.6.2.1::3).

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.



Sl. 1.3.1.1.6.2.1::3 Skup relevantnih zraka u nekoj predikcijskoj točki [Holthuijsen]

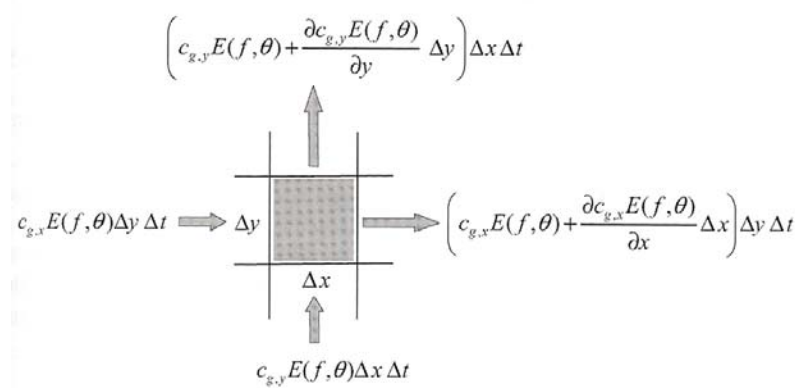
Prva alternativa rješava se Eulerovim pristupom u kojem se spektar ne određuje samo u jednoj predikcijskoj točki nego u velikom broju točaka simultano s lokalnom jednadžbom energetske ravnoteže u svakoj od tih točaka. Ovaj pristup je temeljno gledano ispravan i koristi se u naprednom modeliranju valova (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

parametrizirama (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 energetska 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 1.3.1.1.6.2.1::4). 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.



Sl. 1.3.1.1.6.2.1::4 Pronos energije kroz jednu ćeliju pravilne mreže u Eulerovom pristupu [Holthuijsen]

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

$$\begin{aligned} \text{promjena energije u ćeliji} &= \left(E(f, \theta; x, y, t) \Delta x \Delta y + \frac{\partial E(f, \theta; x, y, t)}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta t \right) \\ &\quad - E(f, \theta; x, y, t) \Delta x \Delta y \\ &= \frac{\partial E(f, \theta; x, y, t)}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta t \end{aligned}$$

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) umanjeno za veličinu energije koja izlazi iz ćelije na desnoj strani (s veličinom koja se razvila na duljini Δx):

$$\begin{aligned} \text{unos energije u } x\text{-smjeru} &= c_{g,x} E(f, \theta; x, y, t) \Delta y \Delta t \\ &\quad - \left(c_{g,x} E(f, \theta; x, y, t) + \frac{\partial c_{g,x} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta t \\ &= - \frac{\partial c_{g,x} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta t \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

$$\text{lokalno generirana energija} = S(f, \theta; x, y, t) \Delta x \Delta y \Delta t$$

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

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

Dijeljenjem gornjeg izraza 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

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

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

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

S matematičkog stajališta ova jednadžba ekvivalentna je jednadžbi razvoja energije duž zrake u dubokom. 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

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

$$+ \frac{\partial c_{\theta} E(f, \theta; \lambda, \varphi, t)}{\partial \theta} = S(f, \theta; \lambda, \varphi, t)$$

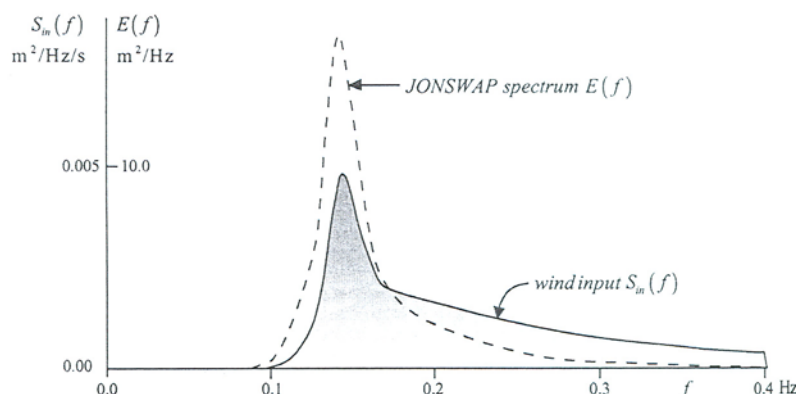
gdje su λ i φ longituda i latituda, $c_{g,\lambda} = (c_g \sin \theta) / (R \cos \varphi)$ i $c_{g,\varphi} = (c_g \cos \theta) / R$ komponente brzine grupe u smjeru longitude i latitute i $c_{\theta} = (c_g \sin \theta \tan \varphi) / R$ brzina rotacije, a R je radijus Zemlje.

Prikazani Eulerov pristup modeliranja valova zapravo je definiran samo jednom jednačbom, jednačbom očuvanja energije, no integracija ove jednačbe u prostoru i vremenu uključuje veliki broj točaka u prostoru i vremenu, te veliki broj valnih komponenti. Jednačbu je potrebno riješiti za svaku kombinaciju tih točaka i komponenti.

Član izvora energije S_{in} 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 1.3.1.1.6.2.1::5).



Sl. 1.3.1.1.6.2.1::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 $H_{m0}=3,5\text{m}$, $T_p=7\text{s}$ i $U_{10}=20\text{m/s}$) [Holthuijsen]

Intenzitet valnog generiranja definiran je izrazom predloženim od Janssena:

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

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:

$$z_0 = \frac{z_{\text{CHARNOCK}} u_*^2}{g} \left(1 - \frac{\tau_w}{\rho_z u_*^2} \right)^{-1/2}$$

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

3.1.1.6.2.2 Lokalne kratkoročne prognoze reprezentativnih parametara valnog profila iz podataka o valovima; t.j. obrada vizualnog opažanja ili valnog zapisa

Ovdje se radi o obradi opažanja valova iz dva različita izvora podataka: iz vizualno opažanih valova i iz instrumentalno mjerenih valova (valnih zapisa). Obrade se mogu raditi za sadašnjost ili unazad. U obadva slučaja prvo se mora obaviti opažanje valova. Rezultat obrade su reprezentativni valni parametri: (najčešće) značajna valna visina H_s i značajni valni period T_s za *kratkoročno stacionarno stanje mora od 10-tak minuta*.

3.1.1.6.2.2.1 *Lokalne kratkoročne prognoze reprezentativnih parametara valnog profila iz vizualnog opažanja valova*

Rezultat obrade su značajna valna visina H_s i značajni valni period T_s . Do njih se dođe vizualnom procjenom srednje valne visine H_v i srednjeg valnog perioda T_v , te smjera dolaska valova što registrira opažač za neki dan i sat. Prema gruboj orijentaciji ono što iskusan opažač procijeni kao prosječnu valnu visinu od 15 do 20 dobro formiranih većih valova u nizu H_v [12] odgovara značajnoj valnoj visini H_s WMO [2]. Zbog toga je H_s i usvojen kao najreprezentativniji valni parametar realnih valova. Vizualno osmotreni prosječni valni period od 15- 20 dobro formiranih uzastopnih većih valova - T_v WMO [12] grubo odgovara značajnom valnom periodu T_s CERC [1]. Na temelju komparacije vizualnih opažanja i objektivnih mjerenja Nordenström [9] je za Sjeverno more, a Cartwright [13] za oceane ustanovio neke relacije:

$$\begin{aligned} H_s &= 1,68 H_v^{0,75} \\ \bar{T}_o &= 0,74 T_v \quad \text{ili} \quad \bar{T}_o = 2,83 T_v^{0,44} \\ H_s &= 1,11 H_v \\ \bar{T}_o &= 0,374 T_v + 5,19 \end{aligned}$$

Izrazi za visine se prilično slažu za valove do 7 m, a za periode su općenito vrlo različiti. To znači da su gornje relacije za valne periode prilično neodređene.

3.1.1.6.2.2.2 *Lokalne kratkoročne prognoze reprezentativnih parametara valnog profila iz instrumentalnih registracija valova*

Podaci za definiranje parametara valnog profila dobiju se iz analognog (kod starijih valografa) ili digitalnog (kod novijeg tipa valografa) valnog zapisa, a smjer valova se procjenjuje iz pridruženog anemografa. Rezultat obrade jednog valnog zapisa su reprezentativni valni parametri: (najčešće) značajna valna visina H_s i značajni valni period T_s . Oni se dobiju izračunom, iz parametara valnog profila pojedinačnih valova u jednom valnom zapisu, prema statističkim definicijama. Obrada parametara valnog profila pojedinačnih valova iz analognog valnog zapisa (metodom uzlaznog, ili silaznog presijecanja nule) i izračun reprezentativnih valnih parametara prema statističkim definicijama u početku se radila mukotrpno "ručno". Potom je uvedena kratka i teorijski utemeljena metoda za ručnu obradu valnih zapisa razvijena od Tuckera 1963. [10] prezentirana u [11] gdje se nalazi i praktični

Tucker-ov duijagram. Vidi detaljno u Pršić [29]. Danas se obrada analognog valnog zapisa vrši digitalnim analizatorom (digitajzerom) s papirnate valografske trake čime se napravi digitalni zapis, koji se kao i kod digitalnog valografa, obradi računalom prema statističkim definicijama.

3.1.1.6.2.2.3 Lokalne kratkoročne prognoze valnih spektara iz podataka o valovima ili vjetru

Pripadaju u **II. eru** vaknih prognoza. Mogu se vršiti unazad ili za sadašnjost ako postoje registracije valova ili vjetra na nekoj točki, odnosno za budućnost ako se takovi podaci predvide. Rezultat prognoze je valni spektar. Termin valni spektar je u praksi sinonim za *lokalni neusmjereni (jednodimenzionalni) jednostrani frekventni spektar pomaka (izdizanja) fizičke površine mora*. Dade se matematički prezentirati istoimenom funkcijom autospektralne gustoće u tabelarnom, grafičkom ili analitičkom vidu.

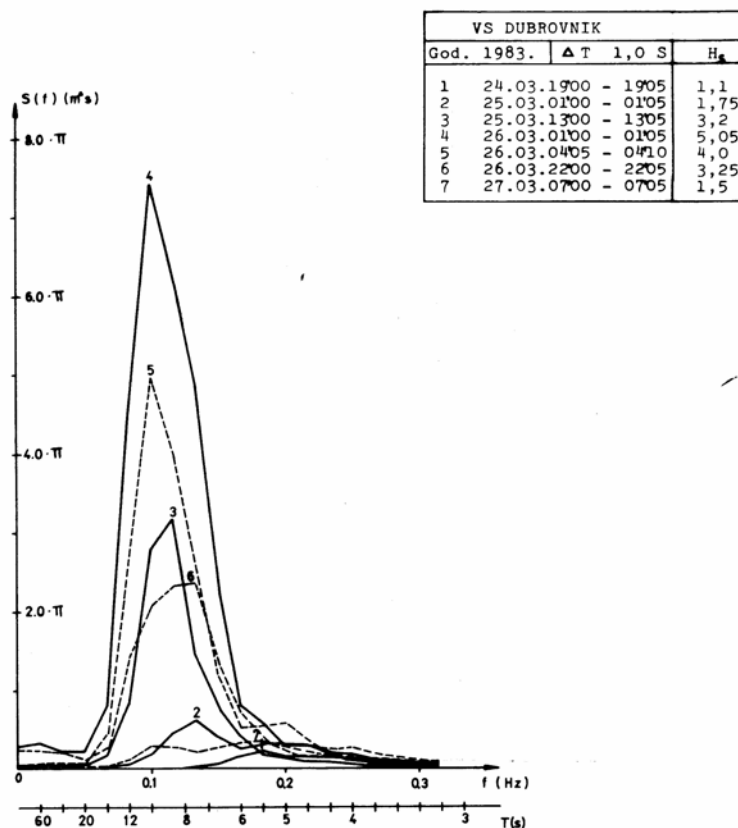
Ako se raspolaže valnim zapisom može se spektralnom analizom izračunati konkretan *empirijski spektar* (Sl. 3.1.1.6.2.2.3::1), a ako se raspolaže reprezentativnim valnim parametrima ili podacima o vjetru tada se stanje mora može približno predstaviti *teorijskim spektrom* u općenitoj matematičkoj formi.

3.1.1.6.2.2.3.1 Određivanje empirijskog spektra iz valnog zapisa

Ako se na nekoj točki načini 10 minutni valni zapis, bez obzira na smjer širenja, može se spektralnom analizom dobiti valni spektar. Za to su, povijesno gledano, razvijene tri matematičke tehnike:

- direktna fourierova transformacija,
- indirektna metoda preko autokorelacijske funkcije i
- brza fourierova transformacija (FFT).

Sve tri su numeričke metode, a rezultat imje graf empirijskog valnog spektra kao na Sl. 3.1.1.6.2.2.3.1::1. Kao što se vidi iz slike cijela meteorološka situacija se može pratiti nizom valnih zapisa i njihovom transformacijom u empirijske spektre.



Sl. . 3.1.1.6.2.2.3.1::1 Empirijski valni spektri ispred Dubrovnika za situaciju 24. do 27.03. 1983.

3.1.1.6.2.2.3.2 Prognoziranje spektra iz podataka o vjetru ili valovima

Često puta se ne raspolaže valnim zapisima iz kojih se mogu izvesti realni spektri, te ih je potrebno prognozirati iz podataka o vjetru i valovima. S druge strane u proračunima konstrukcija pogodno je, umjesto empirijskih spektara u vidu grafa, raspolagati analitičkim izrazom za funkciju spektralne gustoće. Obavljajući ove potrebe zadovoljavaju teorijski spektri. Njihovi analitički izrazi su poluempirijskog karaktera. Osnovna forma im je dobivena teorijskim putem, a numeričke koeficijente određivali su razni autori prilagodbom osnovnog zakona na veliki broj empirijskih podataka. Vrijede samo za dubokovodno more. Ozirom na to koju fazu u razvitku valova prikazuju, spektri se mogu podijeliti na dvije grupe: spektre potpuno razvijenog mora i spektre nepotpuno razvijenog mora. Prvu grupu karakterizira Pierson-Moskowitzov spektar [14], a drugu JONSWAP spektar [16]. **Spektar potpuno razvijenog mora** reprezentira takovo stanje mora kod kojega su privjetrište i trajanje vjetra dovoljno dugi da se ostvari najveći mogući transfer energije vjetra na valove; t.j. takav spektar ovisi samo o brzini vjetra. Njemu su pridruženi najveći mogući valovi za neku brzinu vjetra. Opća matematička forma za taj tip spektra je dana jednadžbom:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^m} e^{-\beta \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^n}$$

gdje je:

$S_{hh}(\omega)$ [m^2s/rad] funkcija spektralne gustoće

ω [rad/s] kutna frekvencija

ω_p [rad/s] kutna frekvencija vrha spektra

$\alpha=8,1 \cdot 10^{-3}$ Philipsova konstanta (parametar spektra)

$\beta=5/4$ parametar spektra

$m=5$

$n=4$

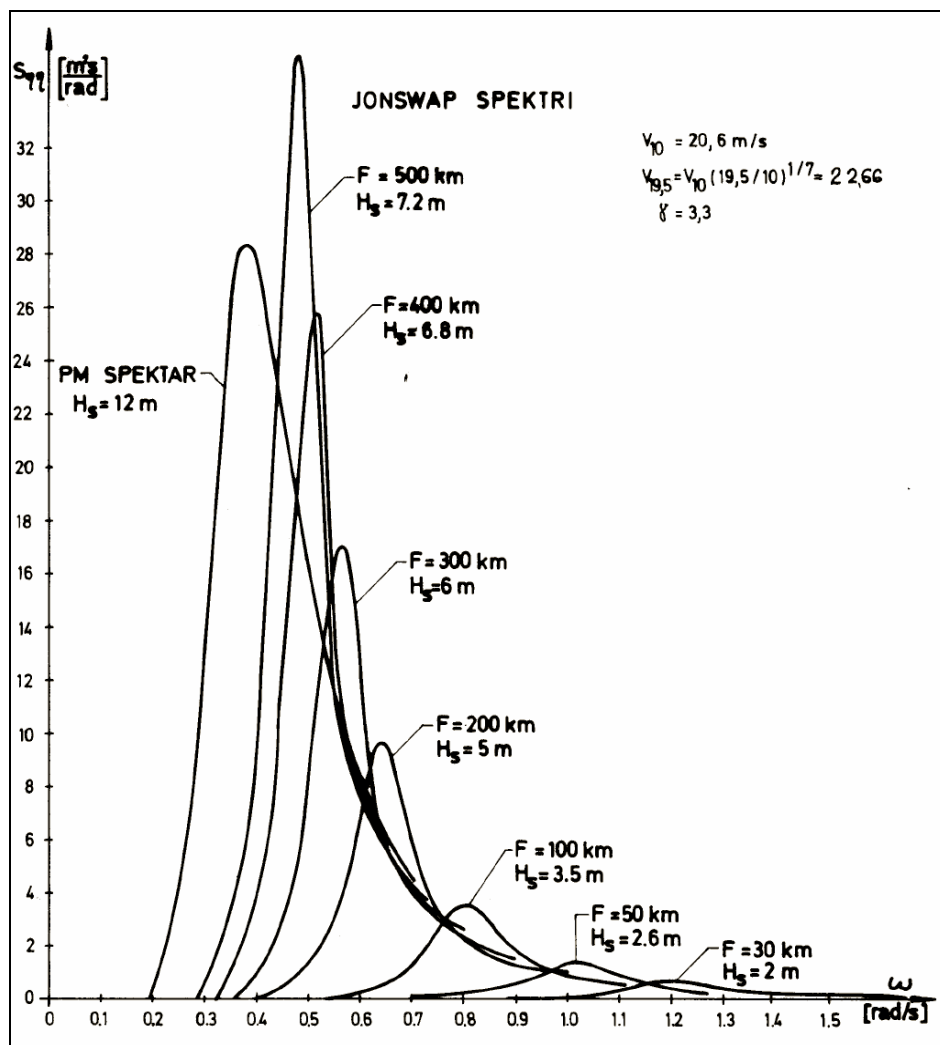
$g=9,81[m/s^2]$ gravitacijska konstanta,

a konačan oblik *Pierson – Moskowitz-ovom* jednačbom iz 1964 [14]:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{8,1 \cdot 10^{-3} g^2}{\omega^5} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{0,8772 g/U}{\omega} \right)^4}$$

$\omega_p=0,8772 g/U$ [rad/s] kutna frekvencija vrha spektra

U [m/s] brzina vjetrova 19,5[m] iznad mirne razine mora



Sl. . 3.1.1.6.2.2.3.2::1 Komparacija PM valnog spektra od vjetra brzine 20,6 m/s s JONSWAP spektrom od vjetra iste brzine, ali ograničenog privjetrišta 30,50,100, 200, 300, 400 i 500 km

Spektre potpuno razvijenog mora razvijali su i drugi autori ili institucije kao na pr.: Darbyshire 1952., British Towing Tank Panel, Neuman 1953. i t.d. Drugi su autori, kao na pr.: Bretschneider 1953., International Ship Structure Conference 1964., International Towing Tank Conference -ITTC 1970. [15] i t.d., izveli spektre potpuno razvijenog mora u funkciji reprezentativnih valnih parametara za takovo stanje mora. Donja jednadžba je primjer takovog ITTC [15] spektra:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{8,1 \cdot 10^{-3} g^2}{\omega^5} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{1,256 / \sqrt{H_s}}{\omega} \right)^4}$$

$\omega_p = 1,256 / \sqrt{H_s}$ [rad/s] kutna frekvencija vrha spektra

H_s [m] značajna valna visina

Spektar nepotpuno razvijenog mora opisuje takovo stanje mora kod kojega još nije ostvaren maksimalni mogući transfer energije s vjetra na valove uslijed ograničavajućeg djelovanja privjetrišta ili trajanja vjetra na

valni generativni proces. Najpoznatiji je JONSWAP spektar [16], a u tu grupu pripadaju ITTC spektar za nepotpuno razvijeno more iz 1984. [21], Mitsiyasu spektar i Ochi-Hubble spektar s dva vrha za kombinaciju živog i mrtvog mora. Na Jadranu su takav spektar razvili Tabain [18] i Smirčić – Gačić [19], a autor ovog teksta posebno za jake bure, te posebno za jaka juga [20]. JONSWAP spektar [16] Sl. 4.5.1.2.3.2::1 se izračunava iz podataka o vjetru, a ima općenitu formu:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} e^{-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4} \cdot \gamma e^{-\left[\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2}\right]}$$

gdje je:

$$\alpha = 0,076 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{-0,22} \quad \text{parametar spektra}$$

$$\beta = 5/4 \quad \text{parametar spektra}$$

$$\omega_p = 2 \cdot \pi \cdot 3,5 \frac{g}{U} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{-0,33} \quad [\text{rad/s}] \quad \text{kutna frekvencija vrha spektra}$$

$$g = 1 \text{ do } 7 \quad \text{mjera povišenja vrha spektra: } g=1 \text{ za PM spektar, } g=3,3 \text{ srednja JONSWAP vrijednost, } g=7 \text{ za vrlo šiljate spektre}$$

$$\sigma \begin{cases} \sigma_a = 0,07 \text{ za } \omega \leq \omega_p \\ \sigma_b = 0,09 \text{ za } \omega > \omega_p \end{cases} \quad \text{mjera širine spektra lijevo i desno od vrha}$$

$$F [\text{m}] \quad \text{privjetrište}$$

$$U [\text{m/s}] \quad \text{brzina vjetra 10[m] iznad mirne razine mora}$$

Prema JONSWAP istraživanju duljina privjetrišta F je ograničavajući faktor koji ne dopušta razvirak vjetrovnih valova do potpuno razvijenog mora u slučaju ako je $F[\text{m}] \leq 2,32 \cdot 10^4 \cdot (U^2/g)$; t.j. stanje mora je definirano brzinom vjetra i duljinom privjetrišta, i može se opisati JONSWAP spektrom prema gornjoj jednadžbi. Trajanje vjetra t je ograničavajući faktor ako je $t[\text{s}] \leq 63,8 \cdot (g/U) \cdot (gF/U^2)^{0,7}$; t.j. stanje mora je u funkciji brzine i trajanja vjetra, i može se opisati JONSWAP spektrom prema gornjoj jednadžbi s time da su njeni promjenljivi parametar α i frekvencija vrha spektra ω_p definirani preko brzine i trajanja vjetra:

$$\alpha = 0,183 \left(\frac{gt}{U} \right)^{-0,286} \quad \text{parametar spektra}$$

$$\omega_p = 2 \cdot \pi \cdot 16,8 \frac{g}{U} \left(\frac{gt}{U} \right)^{-\frac{3}{7}} \quad [\text{rad/s}] \quad \text{kutna frekvencija vrha spektra}$$

Moguće je prognozirati valni spektar nepotpuno razvijenog mora i nabazi podataka o valovima H_s i $\bar{T}_0$. Takav je ITTC spektar iz 1984 [21]. No ako se promatraju samo viša stanja mora, kod kojih je disperzija valnih perioda nešto manja nego kod niskih, moguće je dosta dobro definirati spektar samo s jednim podatkom t.j. sa značajnom valnom visinom H_s . Tako se na primjer valni spektri bure i juga za valove reprezentirane značajnom valnom visinom $H_s 2,5\text{m}$ daju opisati gore navedenim općim JONSWAP izrazom. Vrijednosti konstanti i promjenjivih parametara tog izraza su prema [20] dani u Tab. 3.1.1.6.2.2.3.2::l.

OZNAKA	BURA	JUGO	UVJET PRIMJENE
β	5/4	5/4	
γ	2,2	1,7	
σ_a	0,08	0,08	$\forall \omega < \omega_p$
σ_b	0,1	0,1	$\forall \omega \geq \omega_p$
α	$0,0026 H_s^2 \omega_p^4$	$0,00275 H_s^2 \omega_p^4$	$\forall \omega_p < 1,1 \text{ rad/s}$
ω_p	$\frac{2\pi}{6,4(\ln H_s)^{0,55}}$	$\frac{2\pi}{7,4(\ln H_s)^{0,5}}$	$\forall H_s > 2,5 \text{ m}$

Tab. 3.1.1.6.2.2.3.2::l. Konstante i promjenljivi parametri jadranskog spektra visokih stanja mora bure i juga prema [20] (oznake kao kod općeg JONSWAP izraza)

3.1.1.6.2.3 Regionalne kratkoročne prognoze vjetrovnih valova

Pripadaju u **III. eru valnih prognoza** koje su se počele razvijati nakon pojave prvog takozvanog WAM modela 1988. prezentiranog u članku [22] i kasnijim člancima [23, 24, 25, 26 27]. Ovaj tip prognoze predstavlja vezu prognostičkih modela za valove i atmosferskih modela, a daje kvantitativne rezultate. Razvijen je od t. z. v. Wava Modelling Group-e europskih valnih modelara sredinom '80-tih, a potpuno operativan postao je 1992. Model iz sinoptičke vremenske situacije na nekom rasteru geografskih točaka (na pr. $50 \times 50 \text{ km}$ za Mediteran) izračunava stanje mora (reprezentativne valne parametre). No WAM se isto može načiniti i za prognostičku sinoptičku vremensku situaciju (za 1 do n dana). Tako izračunata stanja mora potvrđena su satelitskim snimkama. Danas je u upotrebi 4. generacija WAM modela. WAM model pripada u vremenske valne prognoze, jer prognozira vjerojatnost pojave parametara valnog profila i vrijeme njihovog pojavljivanja.

Ulazni podaci za regionalne numeričke modele za valne prognoze

Za potrebe numeričke analize valnog generiranja, navedenim numeričkim modelima, nužno je poznavati geometriju područja, tj. batimetriju i obalnu liniju (Sl. 3.1.1.6.2.3::1), te podatke o brzinama i smjerovima vjetra na 10m od površine (iznad kopna ili mora). Dalje su potrebni ulazni podaci o vjetru u vidu vektorskog valnog polja. Ovdje su dana takva 3 primjera za 3 vremenske situacije dobivene iz prognostičkog atmosferskog numeričkog modela Aladin Državni hidrometeorološki zavod RH) s horizontalnom rezolucijom od 8 km i vremenskom rezolucijom od 3 sata (Sl. 3.1.1.6.2.3::2).

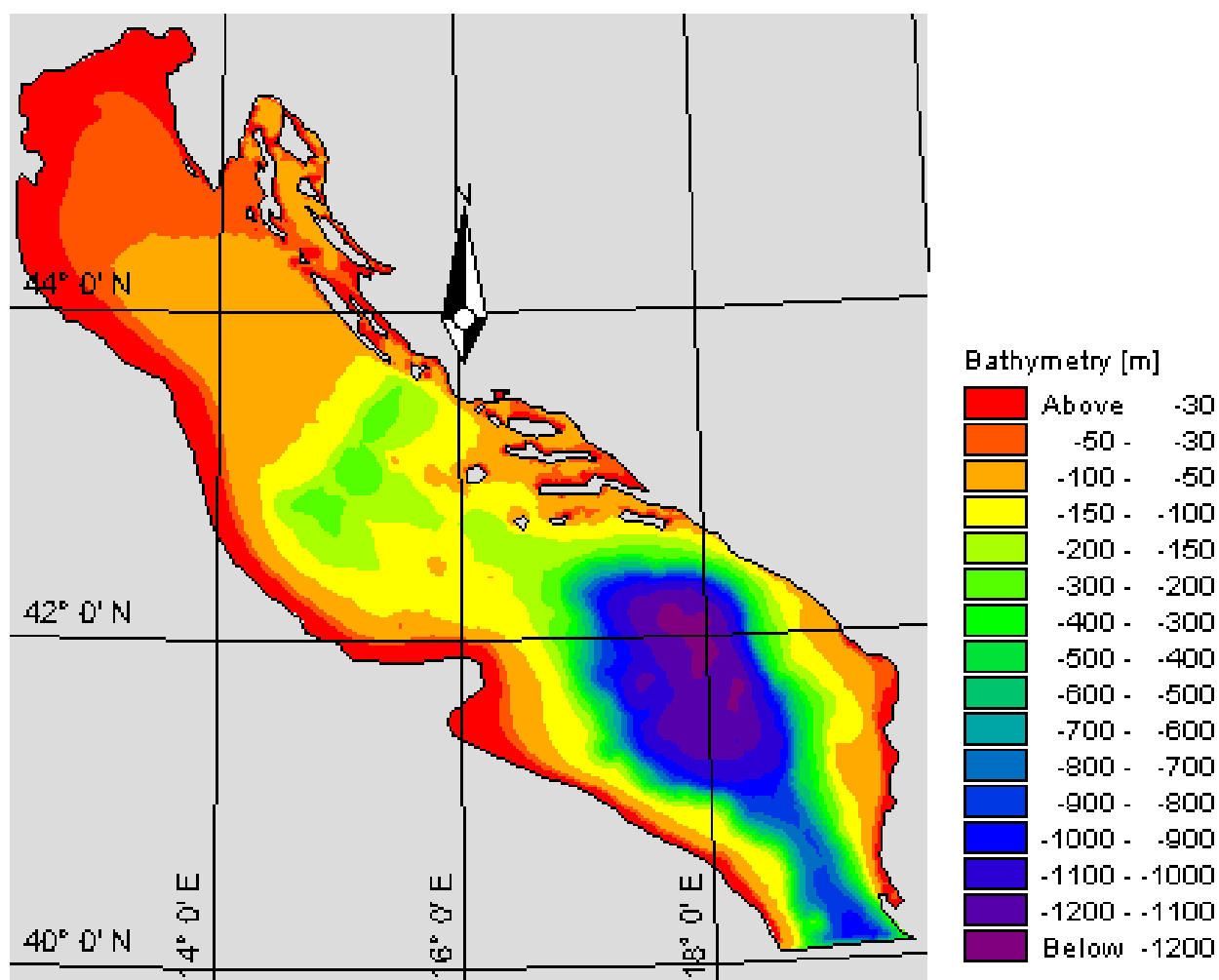
Podaci o vjetru

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.

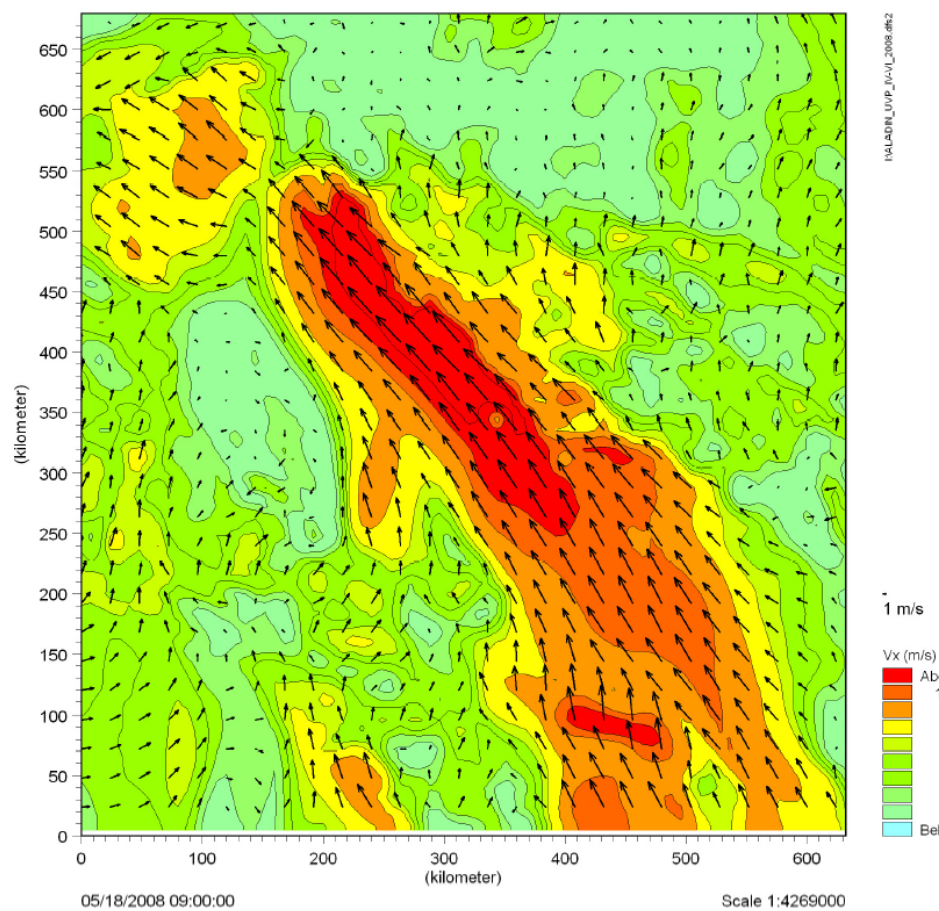
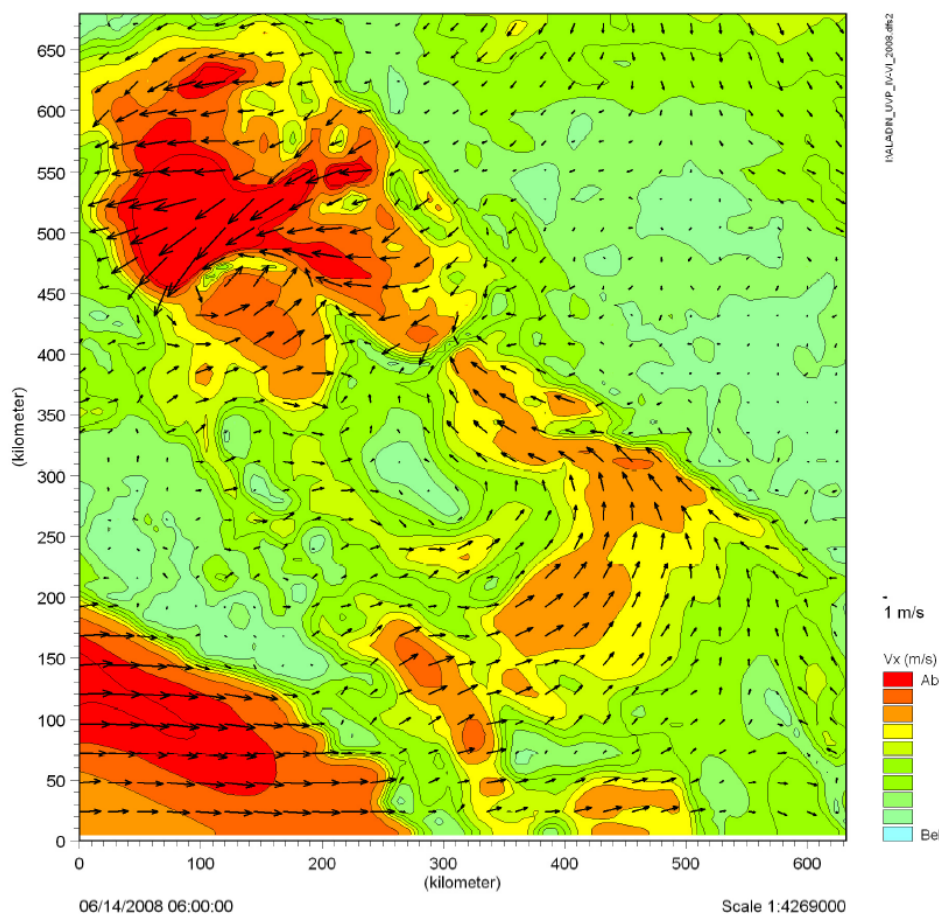
U Državnom hidrometeorološkom zavodu Hrvatske koristi se prognostički model ALADIN (Aire Limitee Adaptation dynamique et Development InterNational). Njegova numerička implementacija je izvedna u kooperaciji sa nekoliko nacionalnih meteoroloških institucija. Model proizlazi iz globalnog ARPEGE (Action 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. 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 s horizontalnom rezolucijom od 8km (Ivatek-Šahdan i Tudor, 2004.) i vremenskom rezolucijom od 3 sata. 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 pogreške dosežu oko 10% srednje godišnje brzine vjetra. Srednja kvadratična 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 prolaskе sinoptičkih procesa dobro modeliran, kao i sekundarni dnevni i tercijarni poludnevni maksimumi vezani za obalnu cirkulaciju (Bajić i sur., 2010.).

Izlazni podaci regionalnih numeričkih modela za valne prognoze

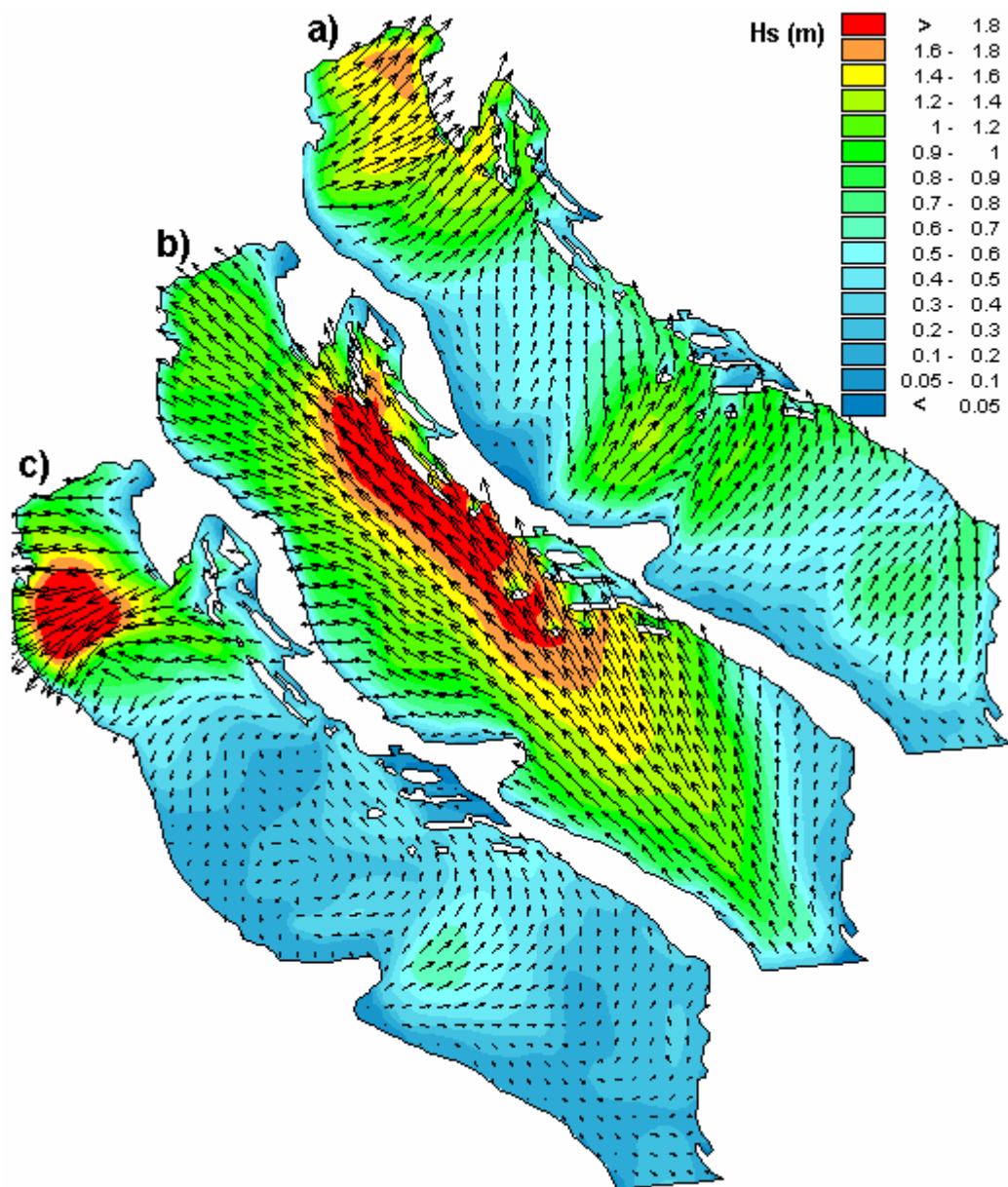
Rezultati analiza su prostorna polja značajnih i maksimalnih valnih visina i pripadnih perioda u promatranom vremenskom intervalu (Sl. 3.1.1.6.2.3::3). Primjer numeričke analize valnog generiranja dobiven je korištenjem numeričkog modela MIKE 21/SW.



Sl. 3.1.1.6.2.3::1 Ulazni podaci o konfiguraciji dna u regionalne numeričke modele za valne prognoze. Prostorna domena numeričkog modela Jadrana sa batimetrijskom podlogom (korištena prostorna rezolucija batimetrijskih podataka je 60").



Sl. 3.1.1.6.2.3::2 Ulazni podaci u regionalne numeričke modele za valne prognoze o vjetru u vidu vektorskog valnog polja. Dana su 3 primjera za 3 različite vremenske situacije (07.04.2008., 18.05.2008. i 14.06.2008.) dobivene iz prognostičkog atmosferskog numeričkog modela Aladin Državni hidrometeorološki zavod RH) s horizontalnom rezolucijom od 8 km i vremenskom rezolucijom od 3 sata

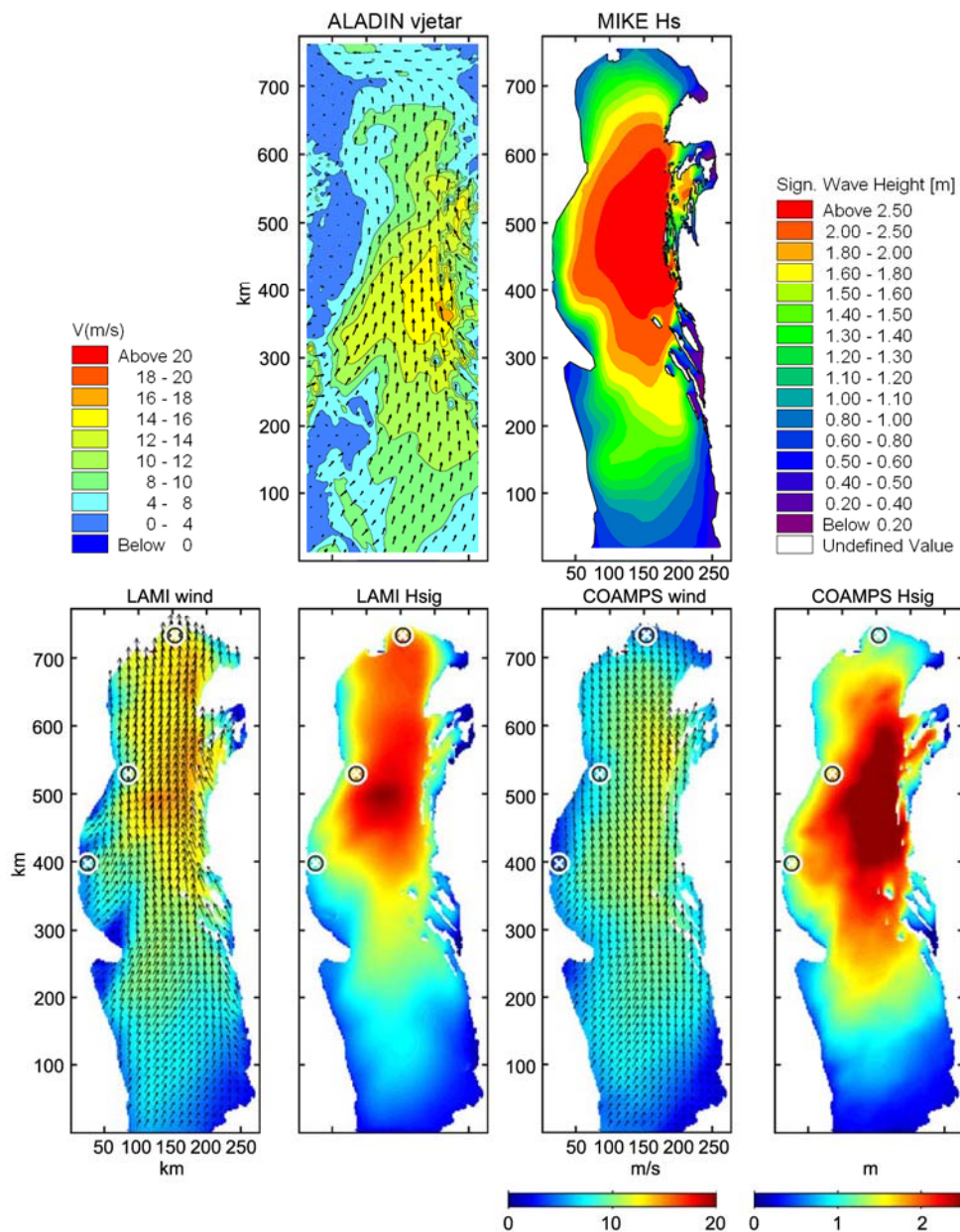


Sl. 3.1.1.6.2.3::3 Izlazni podaci iz regionalnih numeričkih modela za valne prognoze u vidu modelskog polje značajnih valnih visina H_s sa vektorima valnog rasprostiranja za 3 različite vremenske situacije (07.04.2008., 18.05.2008. i 14.06.2008.) dobivene iz prognostičkog atmosferskog numeričkog modela Aladin

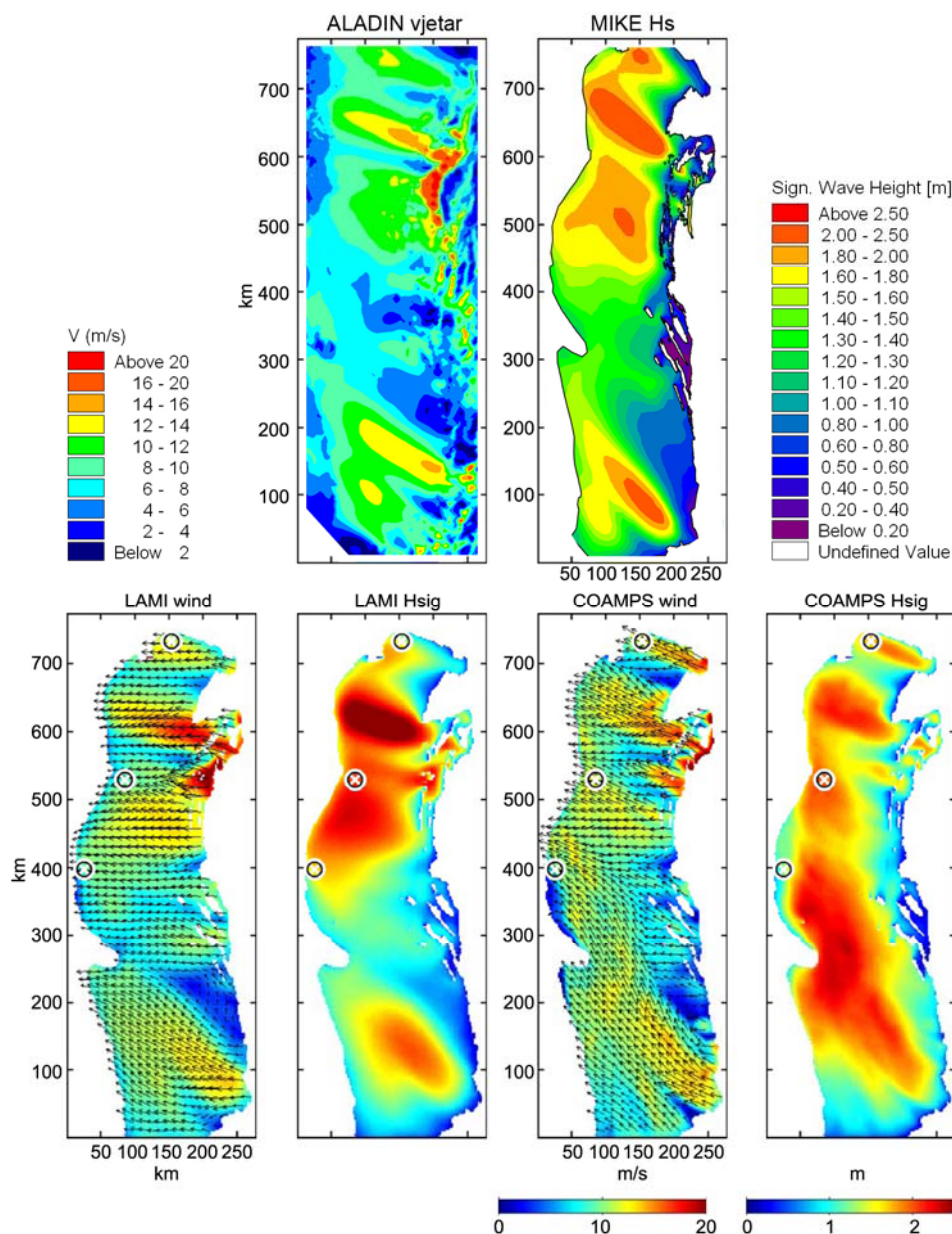
U nastavku je dan primjer kada su korišteni različiti modeli za prognozu brzine vjetra, ALADIN, COAMPS i LAMI. COAMPS model (*The Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System*) je model s rezolucijom 4km i vremenskim korakom 6 sati, a LAMI (*Limited Area Model Italy*) je talijanski operativni prognostički model s vremenskim korakom 3 sata i prognozom +48h. U primjeru su valovi prognozirani ranije

spomenutim modelima SWAN i MIKE/SW. Usporedba rezultata prikazana je na slikama 1.3.1.1.6.2.3.:4 i 4 iz kojih je vidljivo da različiti modeli daju vrlo slične rezultate.

Primjer – Jadranski model:



Sl. 1.3.1.1.6.2.3::4 Polje brzina vjetra i polje značajnih valnih visina definirano različitim modelima u situaciji juga 08.03.2001. – usporedba rezultata Ocvirk (Doktorski rad) i rezultata objavljenih u radu Signell i sur. (dolje)



Sl. 1.3.1.1.6.2.3::5 Polje brzina vjetra i polje značajnih valnih visina definirano različitim modelima u situaciji juga 31.03.2001. – usporedba rezultata Ocvirk (Doktorski rad) i rezultata objavljenih u radu Signell i sur. (dolje)

ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecasting) je europski centar za srednjoročne prognoze, a njihov ECMWF model je globalni prognostički model u horizontalnoj rezoluciji 25km Sl. 3.1.1.6.2.3::3, na devedeset i jednoj vertikalnoj razini. Prognostičke karte se ažuriraju u 10 UTC i 23 UTC. Deterministička prognoza se u visokoj rezoluciji (25km i 91 razina) izračunava za 10 dana unaprijed. Ensemble prognoza (EPS) se računa na 62 razine u rezoluciji 50km (40km po novim podacima) za prvih 10 dana, a 80km do 15-og dana. Simulacije oceanskih valova se za prvih 10 dana računaju u rezoluciji 40km; EPS 15 dana 100km; Europska mora: 5 dana unaprijed na 25km. Sezonske prognoze se računaju jednom mjesečno na 125km i 62 razine, do 7 mjeseci unaprijed.

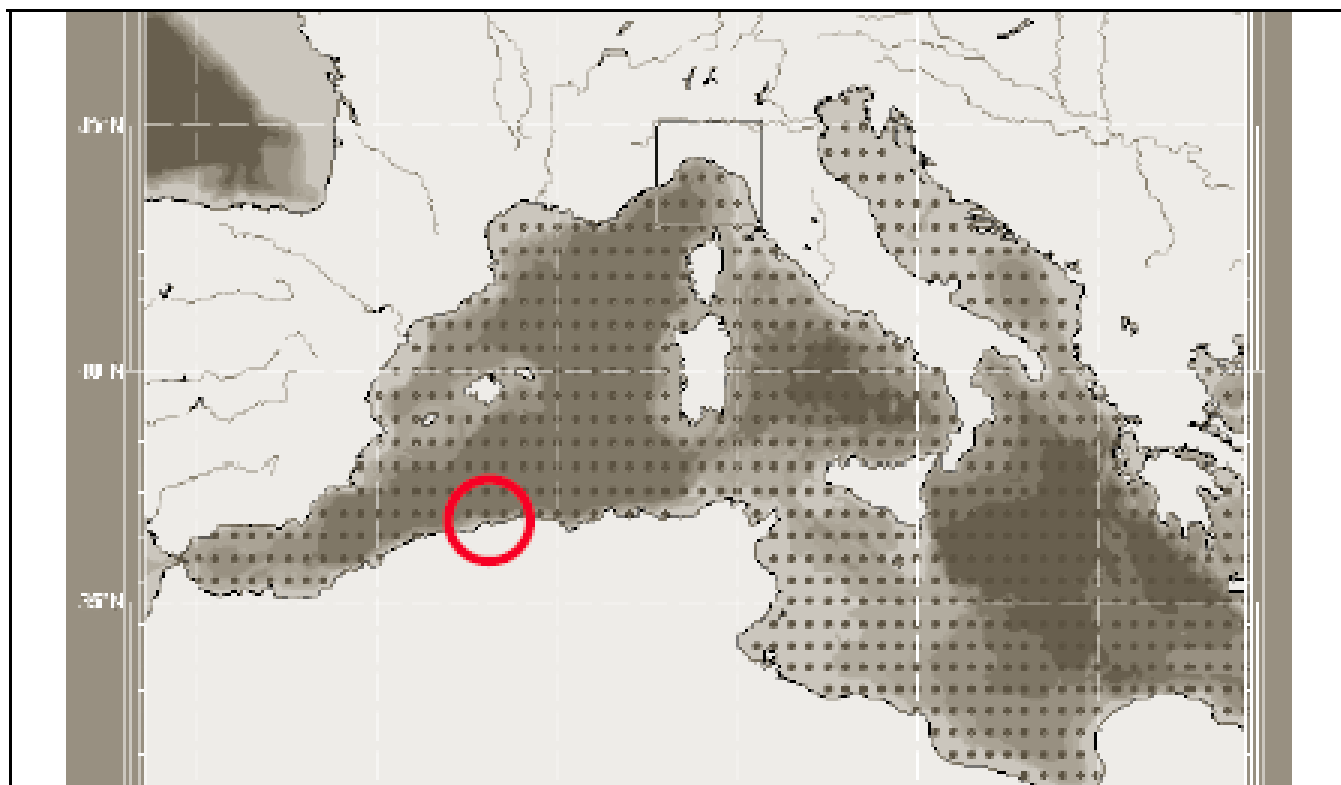


Fig. 3.3 - Mediterraneo occidentale. Distribuzione dei punti WAM

Sl. 3.1.1.6.2.3::6 Izlazni podaci iz regionalnih numeričkih modela za valne prognoze u vidu modelskog polje značajnih valnih visina H_s sa vektorima valnog rasprostriranja za Mediteran

3.1.1.6.3 Lokalne dugoročne statističko-vjerojatnosne prognoze vjetrovnih valova

Takove prognoze rade se za razdoblja od 1 godine do 1 stoljeća, i to tako da se veličinama reprezentativnih valnih parametara pridruži vjerojatnost, ili povratno razdoblje u godinama. Za to je potrebno optimalno 30 godina opažanja, a minimalno 10 godina (za nuždu 5 godina). Pouzdana dugoročna prognoza je za povratno razdoblje 3×dulje od razdoblja opažanja [EAU2004,128]. Obzirom na tako duga razdoblja logično je da valovlje kroz to vrijeme nije stacionaran proces. No u koliko se razdoblje razdjeli u niz dovoljno kratkih odsječaka valni proces će biti skup stacionarnih stanja mora. Tada će reprezentativni parametri za opis valovlja, na pr. H_s i T_s iz velikog broja kratkoročnih stacionarnih stanja mora, određeni kratkoročnim prognozama iz mjerenja valova ili vjetra, formirati nizove statistički nezavisnih valnih podataka. Takvi nizovi su u stvari uzorci odgovarajućih slučajnih varijabli - značajne valne visine $\hat{H}_s$ i - značajnog valnog perioda $\hat{T}_s$ koje imaju svoje raspodjele vjerojatnosti. Općenito postoje dva matematička načina prikazivanja raspodjele reprezentativnih valnih parametara za duga razdoblja:

- *jednodimenzionalnom* raspodjelom za jednu slučajnu varijablu, najčešće $\hat{H}_s$, ali ponekad i $\hat{T}_s$ i
- *dvodimenzionalnom* raspodjelom za istovremenu pojavu slučajnih varijabli $\hat{H}_s$ i $\hat{T}_s$

Kod istovremenog promatranja značajne valne visine i značajnog valnog perioda; t.j. slučajnog vektora $(\hat{H}_s, \hat{T}_s)$ iskustvom u inženjerskoj praksi, došlo se do zaključka da se takva raspodjela može dobro predstaviti dvodimenzionalnom Log-normalnom, ili Weibullovom funkcijom raspodjele vjerojatnosti. Ako se promatra po jedna slučajna varijabla, značajna valna visina $\hat{H}_s$ se daje opisati Log-normalnom, Gumbelovom, Frechetovom ili Weibullovom funkcijom raspodjele vjerojatnosti, dok se valni period daje opisati Log-normalnom funkcijom raspodjele. U nastavku će se prikazati samo jednodimenzionalne raspodjele za značajne valne visine!

Ako se raspolaze uzorkom iz dugog niza godina, neke od rečenih slučajnih varijabli $\hat{H}_s$ i $\hat{T}_s$, tada se može odrediti “*dugoročna jednodimenzionalna raspodjela vjerojatnosti*”. Tako se na primjer iz cjelokupnog uzorka s razdobljem opažanja dužine 10 godina, po kriteriju prekoračenja nekog visokog praga, formira uzorak smanjenog opsega i temeljem njega određuje empirijska a potom i teorijska dugoročna raspodjela vjerojatnosti bilo slučajne varijable $\hat{H}_s$ bilo $\hat{T}_s$. Uzorak formiran po kriteriju prekoračenja praga naziva se i “*niz prekoračenja*” kao u Primjeru 4.5.1.4.:1. Ako se raspolaze uzorkom iz 30-godišnjeg opažanja neke od rečenih slučajnih varijabli $\hat{H}_s$ i $\hat{T}_s$, tada se može odrediti “*jednodimenzionalna raspodjela vjerojatnosti ekstrema*”. Tako se na primjer iz cjelokupnog uzorka s razdobljem opažanja dužine 30 godina izdvoje godišnji ekstremi i formira uzorak manjeg opsega. Temeljem njega određuje se empirijska, a potom i teorijska raspodjela vjerojatnosti ekstrema. Uzorak formiran po kriteriju godišnjih ekstrema se naziva i “*niz maksimuma*”. No, kod ovakve datoteke može se formirati i niz prekoračenja. Svaki od ta dva tipa uzorka s pripadajućom jednodimenzionalnom raspodjelom vjerojatnosti omogućava proračun reprezentativnih valnih parametara (na pr. H_s^{PR} ili T_s^{PR}) male vjerojatnosti (vrlo rijetkog pojavljivanja), odnosno dugog povratnog razdoblja $PR=1.....100$ godina. Ipak najčešće se prognoziraju ekstremne značajne valne visine, a kvalitetnija je prognoza temeljem raspodjele vjerojatnosti ekstrema iz 30-godišnjeg opažanja. Postupak proračuna je istovjetan i za dugoročnu raspodjelu (Long-Term Distribution, opažanje 10god.) i za raspodjelu ekstrema (Extreme Value Distribution, opažanje 30god.). Najprije se iz uzorka ustanovi *empirijska raspodjela vjerojatnosti*. Za to je potrebno uzorak poredati po opadanju i proračunati vjerojatnosti premašenja po jednoj od kompromisnih formula, na pr. po Hazenovoj: $P(H_{s,i}) = P(\hat{H}_s \geq H_{s,i}) = \frac{2 \cdot F_i - 1}{2 \cdot n}$. Pri tome je:

$\hat{H}_s$ slučajna varijabla značajne valne visine

$H_{s,i}$ [m] i-ta vrijednost slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_s$ u

	uzorku složenom po opadanju
n	opseg uzorka; tj. broj podataka (vrijednosti $H_{S,i}$ u uzorku slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$ za proračun raspodjele
$i=1.....n$	redni broj razmatrane vrijednosti $H_{S,i}$ slučajne varijable značajne valne visine u uzorku slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$ složenom po opadanju
f_i	apsolutna učestalost i -te vrijednosti slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$; tj. broj ponavljanja značajnih valnih visina $H_{S,i}$ u uzorku opsega n
$F_i = \sum_{j=1}^i f_j$	zbirna apsolutna učestalost i -te vrijednosti slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$; tj. broj značajnih valnih visina $H_{S,i}$ iz uzorka slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$ koje dostižu ili premašuju vrijednost $H_{S,i}$
$P(\hat{H}_S \geq H_{S,i}) \equiv P(H_{S,i})$	vjerojatnost premašenja i -te vrijednosti $H_{S,i}$ slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$
$P(\hat{H}_S \geq H_S) \equiv P(H_S)$	teorijska funkcija raspodjele vjerojatnosti slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$

Potom se parovi $[H_{S,i}; P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})]$ stavljaju se u koordinatni sustav $H_S; P(\hat{H}_S \geq H_S)$ što predstavlja empirijsku raspodjelu vjerojatnosti slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$ u vidu "oblaka" točaka (Sl. 3.1.1.6.3::1). Na abscisi su vrijednosti značajne valne visine H_S , a na ordinati vjerojatnosti premašenja $P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})$. Ako se na skup parova $[H_{S,i}; P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})]$ prikazan točkama u koordinatnom sustavu; t.j. na empirijsku raspodjelu prilagodi krivulja dobije se teorijska funkcija raspodjele vjerojatnosti $P(\hat{H}_S \geq H_S) \equiv P(H_S)$ slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$ (Sl. 3.1.1.6.3::1a). Vjerojatnost dostizanja ili

premašenja bilo koje vrijednosti $H_{S,i}$ slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$, pa i one veoma velike i rijetke koja nikad nije izmjerena, može se odrediti grafičkim ili numeričkim putem produljenjem teorijske funkcije raspodjele vjerojatnosti u područje izvan izmjerenih vrijednosti. Dok je to određivanje prilično pouzdano u području raspoloživih podataka (točaka empirijske raspodjele) dotle je nepouzdan u području produljenja krivulje izvan područja podataka. To stoga jer prilagodba krivulje na skup točaka nije jednoznačna. Naime, na jedan skup točaka može se dobro prilagoditi više tipova krivulja čija se njihova produljenja (ekstrapolacije) izvan područja raspoloživih podataka neće poklapati. Problem se rješava transformacijom skale osi apscisa s H_S na $\ln H_S$ tako da se funkcija raspodjele vjerojatnosti poravna na pravac. Tada će se empirijska funkcija raspodjele vjerojatnosti; tj. skup parova $[H_{S,i}; P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})]$ prikazan "oblakom" točaka u koordinatnom sustavu, prilagoditi pravac i teorijska funkcija raspodjele vjerojatnosti slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$ bit će jednoznačno određena (Sl. 3.1.1.6.3::1b). Način određivanja teorijske funkcije raspodjele prikazat će se u Primjeru 3.1.1.6.3 Dugoročna prognoza.

Kad je jednom poznata teorijska funkcija raspodjele vjerojatnosti $P(\hat{H}_S \geq H_S) \equiv P(H_S)$ (pravac) povratno razdoblje bilo koje vrijednosti slučajne varijable značajne valne visine $H_{S,i}$, pa i one veoma velike i rijetke koja nikad nije izmjerena, može se odrediti prema izrazu

$$PR[\text{god}] = \frac{T_{\text{REG}}}{n} \cdot \frac{1}{P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})},$$

jer je na raspolaganju teorijska funkcija raspodjele vjerojatnosti $P(\hat{H}_S \geq H_S)$ slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$ preko koje se vrijednosti $H_{S,i}$ dade pridružiti vjerojatnost njenog dostizanja ili premašenja $P(\hat{H}_S \geq H_{S,i}) \equiv P(H_{S,i})$.

Pritom je:

T_{REG} [god] razdoblje besprekidnog opažanja (ili mjerenja) vrijednosti značajne valne visine iz kojeg je dobiven uzorak,

PR [god] povratno razdoblje; tj broj godina u kome razmatrana vrijednost značajne valne visine $H_{S,i}$ može biti 1 puta dostignuta ili premašena.

Češća je zadaća odrediti značajnu valnu visinu H_S^{PR} nekog povratnog razdoblja od PR godina. Određuje se tako da se izračuna vjerojarnost koja je pridružena toj valnoj visini

$$P(\hat{H}_S \geq H_S^{PR}) = \frac{T_{REG}}{n} \cdot \frac{1}{PR}$$

H_S^{PR} [m] značajna valna visina povratnog razdoblja od PR godina

i potom se na grafu teorijske funkcije raspodjele vjerojatnosti $P(\hat{H}_S \geq H_S)$ za vjerojatnost $P(\hat{H}_S \geq H_S^{PR})$ preslikavanjem odredi značajna valna visina H_S^{PR} (Sl. 3.1.1.6.3::1b).

Primjer 3.1.1.6.3::1 Dugoročna prognoza značajnih valnih visina **OBAVEZNO ZA ISPIT**

Zadatak:

Iz trogodišnjih podataka o značajnim valnim visinama, na bazi mjerenja valografom, formiran je uzorak s pragom na 1,8 m (Tablica 4.5.1.4::I). Treba načiniti dugoročnu "L-N" raspodjelu vjerojatnosti značajnih valnih visina i izračunati značajne valne visine 100, 50, 20 i 10-godišnjeg povratnog razdoblja.

Rješenje:

a) Uređivanje uzorka i empirijska raspodjela vjerojatnosti

Ukupan broj podataka kroz vrijeme opažanja $T_{REG}=3$ [god] iznosi $n'=3 \times 365 \times 8=8760$. Uzorak je formiran od onih značajnih valnih visina koje prelaze prag od $H_s^{prag} \geq 1,8$ [m], a takvih je $n=3108$. Njihovim uređenjem kao u Tablici 4.5.1.4::I dobije se empirijska raspodjela vjerojatnosti značajne valne visine.

Razred	Razred valnih visina	Srednja valna visina	Apsolutna učestalost	Zbirna apsolutna učestalost	Vjerojatnost premašenja
	[m]	[m]			
1	9,60-9,01	9,3	6	6	0,00177
2	9,00-8,41	8,7	12	18	0,00563
3	8,40-7,81	8,1	6	24	0,00756
4	7,80-7,21	7,5	24	48	0,01528
5	7,20-6,61	6,9	36	84	0,02687
6	6,60-6,01	6,3	30	114	0,03652
7	6,00-5,41	5,7	72	186	0,05968
8	5,40-4,81	5,1	138	324	0,10409

9	4,80-4,21	4,5	210	534	0,17165
10	4,20-3,61	3,9	396	930	0,29907
11	3,60-3,01	3,3	480	1410	0,45351
12	3,00-2,41	2,7	738	2148	0,69096
13	2,40-1,80	2,1	960	3108	0,99984
n =			3108		

Tablica 3.1.1.6.3::I Uređeni uzorak značajnih valnih visina iz trogodišnjeg opažanja koji prelaze prag od 1,8 m s empirijskom raspodjelom vjerojatnosti

Vjerojatnost dostizanja ili premašenja neke valne visine računata je pritom u tablici 3.1.1.6.3::I kao *Hazen-ova kompromisna vjerojatnost*:

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

gdje je :

$\hat{H}_s$ - slučajna varijabla značajne valne visine

$H_{s,i}$ - i-ta vrijednost slučajne varijable [m]

$F_i = \sum_{j=1}^i f_j$ - zbirna apsolutna učestalost i-te vrijednosti slučajne varijable $\hat{H}_s$

f_i - apsolutna učestalost i-te vrijednosti slučajne varijable $\hat{H}_s$

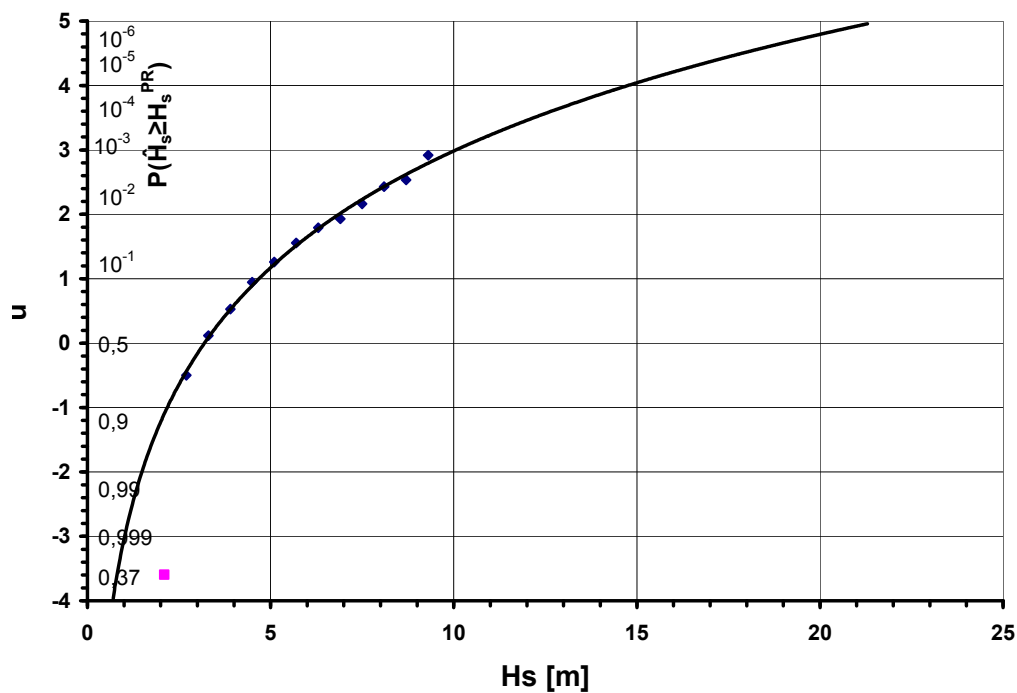
Za prvi i drugi razred Tablice 4.5.1.4::I kompromisne vjerojatnosti su :

$$P(\hat{H}_s \geq 9,3) = \frac{2 \cdot 6 - 1}{2 \cdot 3108} = 0,00177$$

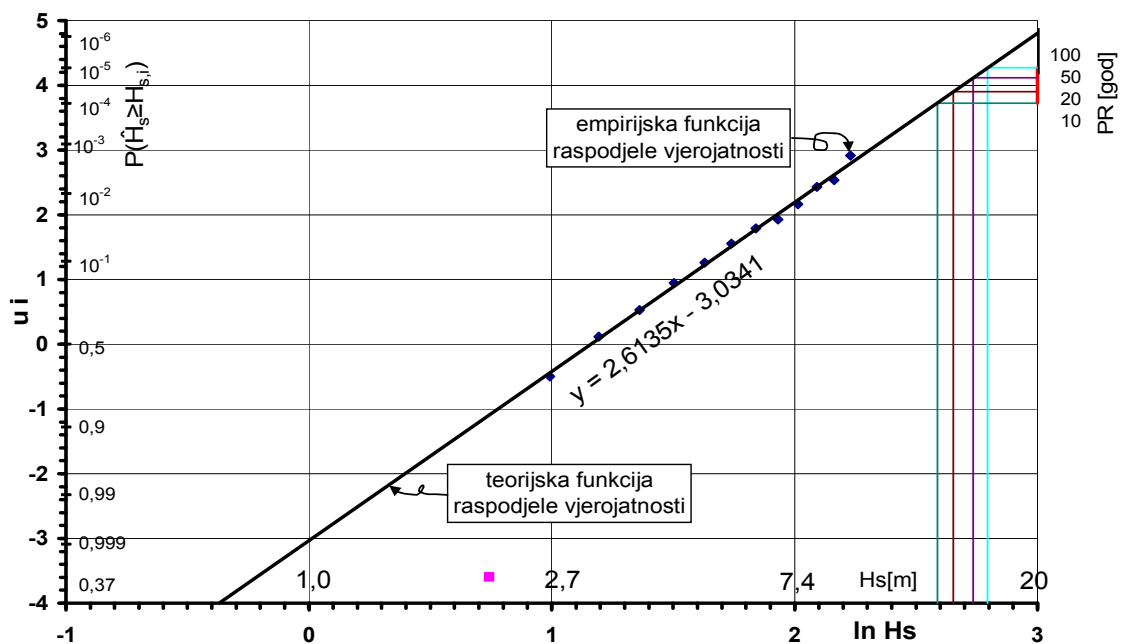
$$P(\hat{H}_s \geq 8,7) = \frac{2 \cdot 18 - 1}{2 \cdot 3108} = 0,00563$$

b) *Prilagodba teorijske aspodjele vjerojatnosti na empirijsku pravcem pomoću metode najmanjih kvadrata*

a) Normalna (Gaussova)



b) Log-normalna (Galtonova)



Slika 3.1.1.6.3::1 Dugoročna raspodjela značajnih valnih visina. Najdonja točka empirijske raspodjele (2,1 ; 0,99984) ispuštena je kod prilagodbe pravca na "oblak točaka", jer ne doprinosi definiranju pravca u području ekstremnih vrijednosti

Polazi se od iskustvene činjenice da se raspodjela vjerojatnosti slučajne varijable $\hat{H}_s$ ravna prema Normalnom ili Gaussovom zakonu raspodjele vjerojatnosti. Na temelju

proračunatih vjerojatnosti iz Tablice 3.1.1.6.3.:I na Sl. 3.1.1.6.3.:1a prikazani su parovi $[H_{S,i}; P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})]$ u vidu "oblaka" točaka i prilagodbe tih točaka krivuljom u koordinatnom sustavu $H_S; P(\hat{H}_S \geq H_S)$. Parovi $[H_{S,i}; P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})]$ predstavljaju empirijsku raspodjelu vjerojatnosti slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$.

Prilagodba dugoročne raspodjele vjerojatnosti krivuljom u praksi nije prihvatljiva pošto nije moguće jednoznačno ekstrapolirati krivulju izvan područja podataka ("oblaka točaka"). Problem se rješava korištenjem Log-Normalnog (L-N) zakona raspodjele u kojem se raspodjela vjerojatnosti slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$ ravna po pravcu (Sl. 3.1.1.6.3.:1b).

Kod L-N raspodjele, umjesto s prirodnim vrijednostima $H_{S,i}$ slučajne varijable $\hat{H}_S$ barata se logaritmima vrijednosti $\ln H_{S,i}$. Za ovakav grafički prikaz zakona raspodjele promatrane slučajne varijable $\hat{H}_S$ pravcem, koriste se gotovi Log-Normalni papiri vjerojatnosti kao na Sl. 3.1.1.6.3.:1b s kalibriranim koordinatnim osima $\ln H_S$ i $P(\hat{H}_S \geq H_S)$. U takvom koordinatnom sustavu prvo se nacrtava empirijska raspodjela vjerojatnosti iz Tablice 3.1.1.6.3.:I; t.j. "oblak točaka".

Potom se na empirijsku raspodjelu vjerojatnosti (pomoću jedne od četiri poznate metode prilagodbe: najmanjih kvadrata, najveće vjerodostojnosti, metoda momenata ili od oka) prilagodi pravac regresije koji predstavlja L-N zakon raspodjele vjerojatnosti promatrane slučajne varijable $\hat{H}_S$.

Taj se pravac može jednoznačno ekstrapolirati izvan područja podataka ("oblaka točaka"), pa i u područje malih vjerojatnosti; odnosno velikih valnih visina koje u raspoloživom uzorku vrijednost slučajne varijable - $H_{S,i}$ nisu niti registrirane. Na slici Sl. 3.1.1.6.3.:1b pravac je prilagođen metodom najmanjih kvadrata.

- c) *Proračun značajne valne visine nekog povratnog razdoblja $\equiv$ dugoročna prognoza značajne valne visine*

Kod određivanja valne visine 100, 50, 20, 10-godišnjeg povratnog razdoblja PR [god.] prvo treba izračunati vjerojatnosti koje pripadaju tim povratnim razdobljima uz pomoć izraza:

$$P(\hat{H}_S \geq H_S^{PR}) = \frac{T_{REG}[\text{god.}]}{n} \cdot \frac{1}{PR[\text{god.}]} \quad \text{gdje je:}$$

H_S^{PR} [m] značajna valna visina povratnog razdoblja od PR godina.

Tada vrijede slijedeće relacije:

za PR=100 [god]	$P(\hat{H}_S \geq H_S^{100g}) = \frac{3}{3108} \cdot \frac{1}{100} = 9,65 \cdot 10^{-6} \sim 1 \cdot 10^{-5}$
za PR=50 [god]	$P(\hat{H}_S \geq H_S^{50g}) = \frac{3}{3108} \cdot \frac{1}{50} = 1,93 \cdot 10^{-5} \sim 2 \cdot 10^{-5}$
za PR=20 [god]	$P(\hat{H}_S \geq H_S^{20g}) = \frac{3}{3108} \cdot \frac{1}{20} = 4,83 \cdot 10^{-5} \sim 5 \cdot 10^{-5}$
za PR=10 [god]	$P(\hat{H}_S \geq H_S^{10g}) = \frac{3}{3108} \cdot \frac{1}{10} = 9,65 \cdot 10^{-5} \sim 1 \cdot 10^{-4}$

pomoću kojih se na Sl. 3.1.1.6.3::1 b može nacrtati pomoćna ordinatna skala povratnih razdoblja PR[god]. Nakon toga jednostavnim preslikavanjem preko pravca na Sl. 3.1.1.6.3::1b (zakona raspodjele vjerojatnosti $\hat{H}_S$) dobiju se:

za PR=100 [god].....	$H_S^{100g} = 16,3$ [m]
za PR=50 [god].....	$H_S^{50g} = 15,3$ [m]
za PR=20 [god].....	$H_S^{20g} = 14,2$ [m]
za PR=10 [god].....	$H_S^{10g} = 13,8$ [m]

d) *Konstrukcija Log-normalnog zakona raspodjele vjerojatnosti značajne valne visine $\hat{H}_S$ metodom momenata*

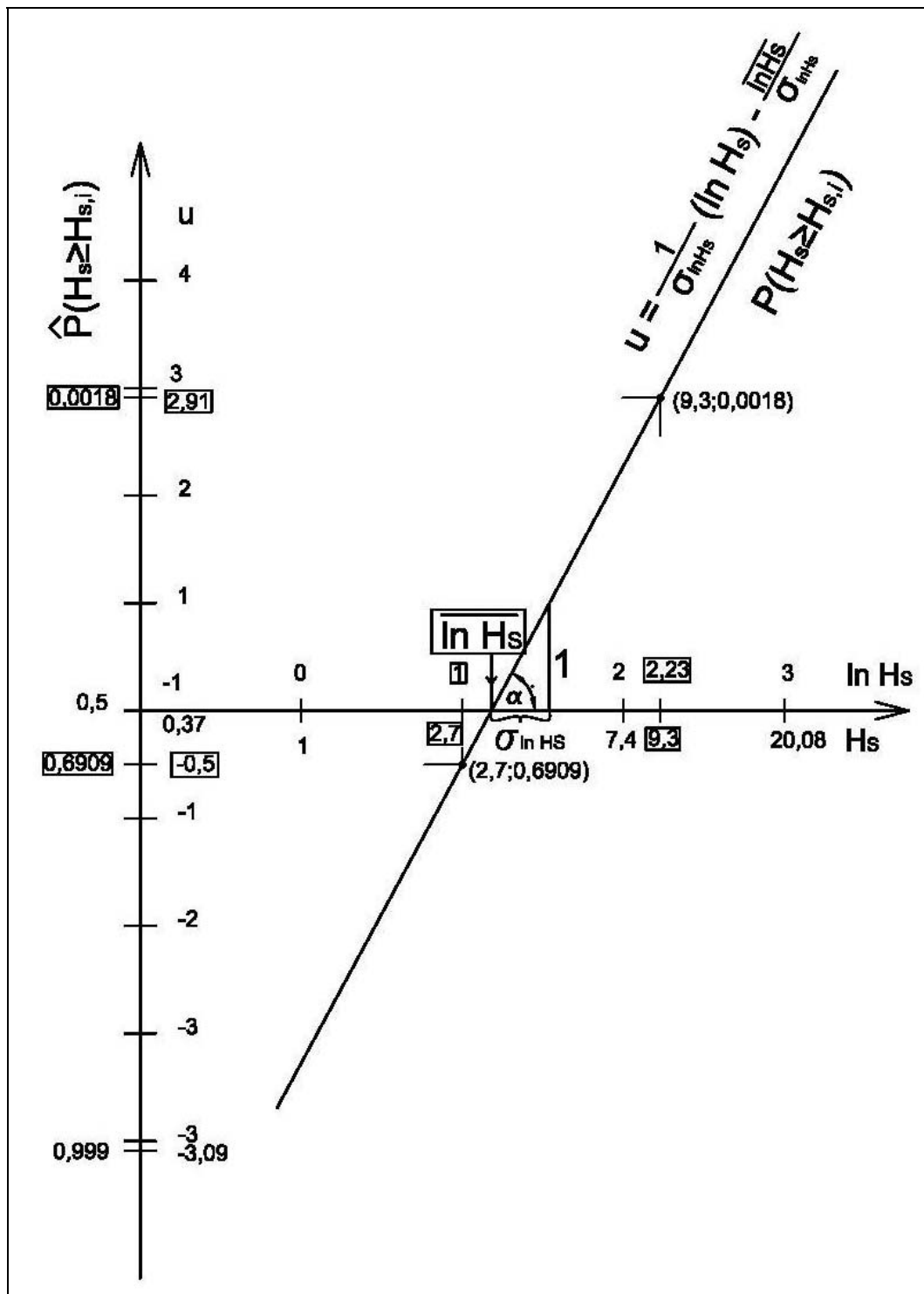
Log-Normalni zakon dugoročne raspodjele vjerojatnosti značajne valne visine $\hat{H}_S$ može se u linearnoj formi, osim metodom najmanjih kvadrata, konstruirati i metodom momenata. Polazi se od izraza za funkciju gustoće vjerojatnosti slučajne varijable $\ln \hat{H}_S$ koji glasi:

$$p(\ln H_S) = \frac{1}{\sigma_{\ln H_S} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln H_S - \overline{\ln H_S}}{\sigma_{\ln H_S}} \right)^2}$$

Funkcija raspodjele vjerojatnosti tada je:

$$P(\ln \hat{H}_S \geq \ln H_S) = \int_{\ln H_S}^{+\infty} \frac{1}{\sigma_{\ln H_S} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln H_S - \overline{\ln H_S}}{\sigma_{\ln H_S}} \right)^2} d(\ln H_S) = \int_{\ln H_S}^{+\infty} \frac{1}{H_S \sigma_{\ln H_S} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln H_S - \overline{\ln H_S}}{\sigma_{\ln H_S}} \right)^2} dH_S =$$

$$= 0,5 - \int_0^{\ln H_S} \frac{1}{\sigma_{\ln H_S} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln H_S - \overline{\ln H_S}}{\sigma_{\ln H_S}} \right)^2} dH_S = P(\hat{H}_S \geq H_S) = P(H_S)$$



Sl. 3.1.1.6.3::2 Konstrukcija log-normalnog zakona vjerojatnosti u linearnoj formi metodom momenata

Ako se u zadnji izraz uvede supstitucija $u = \frac{\ln H_s - \ln H_s}{\sigma_{\ln H_s}} = \frac{1}{\sigma_{\ln H_s}} (\ln H_s) - \frac{\ln H_s}{\sigma_{\ln H_s}} = u(\ln H_s)$ dobije se normirana Gaussova funkciju raspodjele vjerojatnosti $N[0,1]$ slučajne varijable " $\hat{H}_s$ ":

$$P(H_s) = P(\hat{H}_s \geq H_s) = 0,5 - \int_0^{\ln H_s} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}u^2} du$$

Izraz $u(\ln H_S)$ je u stvari jednadžba pravca u koordinatnom sustavu " $\ln H_S; u$ ". Sjecište pravca s osi $\ln H_S$ dobije se za $u=0$ što daje: $\ln H_S = \overline{\ln H_S}$. Nagib tog pravca je $\tan \alpha = 1/\sigma_{\ln H_S}$ (Sl. 3.1.1.6.3::2). Pravac predstavlja vezu logaritamske skale " $\ln H_S$ " i linearne skale " u ". No ako se za vrijednosti " u " pomoću gornjeg izraza izračunaju vjerojatnosti $P(H_S)$ i pridruže vrijednostima " u " na ordinatnoj skali (Sl. 3.1.1.6.3::2) dobije se veza između logaritamske skale " $\ln H_S$ " i nelinearne skale " $P(H_S)$ "; t.j. Log-Normalni zakon distribucije značajne valne visine " $\hat{H}_S$ " u formi pravca.

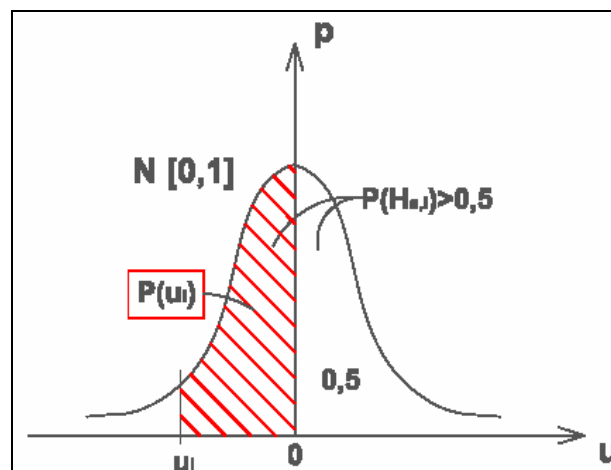
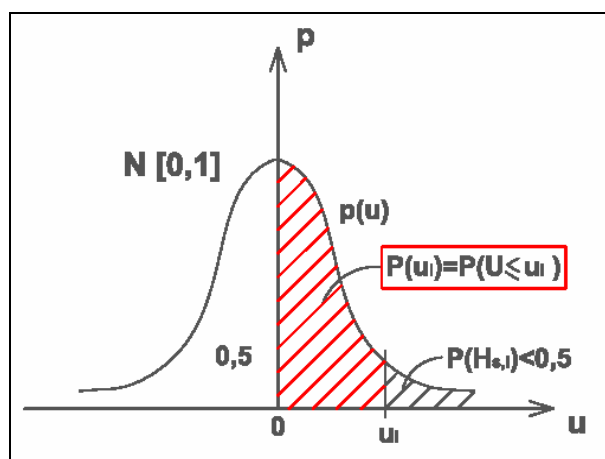
e) *Crtanje Log-Normalne empirijske raspodjele vjerojatnosti*

Empirijsku Log-Normalnu raspodjelu vjerojatnosti predstavlja već spomenut "oblak točaka" t.j. parova $[\ln H_{S,i}; P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})]$. Prikazat će se na primjeru crtanja para (točke) $[H_{S,1}; P(\hat{H}_S \geq H_{S,1})] = [9,3; 0,00177]$. Problem je pri tom da ordinatna skala $P(\hat{H}_S \geq H_S)$ nije linearna nego se kalibrira integriranjem Gauss-ove funkcije gustoće vjerojatnosti. Rješenje je problema uvođenje transformirane slučajne varijable " U " s njezinim vrijednostima " u ". Ta slučajna varijabla ima, kao i slučajna varijabla $\hat{H}_S$, normalnu raspodjelu vjerojatnosti, ali normiranog oblika $N[0,1]$ koja je tabulirana u Gaussovima tablicama (Tablica 3.1.1.6.3::III). Ako se linearne vrijednosti " u_i " nacrtaju na linearnoj ordinatnoj skali njima se mogu pridružiti nelinearne vrijednosti $P(H_{S,i}) = P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})$ prema relacijama:

$$P(\hat{H}_S \geq H_{S,i}) = 0,5 - P(u_i) \rightarrow P(u_i) = 0,5 - P(\hat{H}_S \geq H_{S,i}); \quad \forall \quad P(H_{S,i}) < 0,5$$

$$P(u_i) = 0 \quad \forall \quad P(H_{S,i}) = 0,5$$

$$P(\hat{H}_S \geq H_{S,i}) = 0,5 + P(u_i) \rightarrow P(u_i) = P(\hat{H}_S \geq H_{S,i}) - 0,5; \quad \forall \quad P(H_{S,i}) > 0,5$$

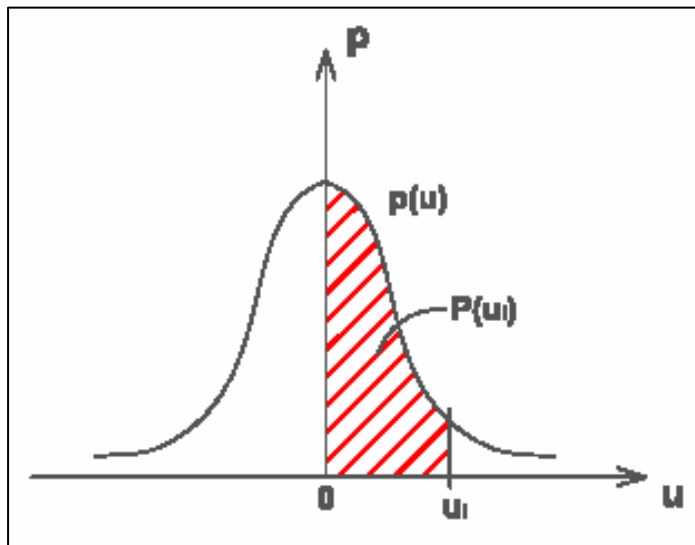


Sl. 3.1.1.6.3::3 Definijske skica za gornje relacije

To se praktično provodi tako da se za željene vjerojatnosti premašenja $P(H_{S,i}) = P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})$ prema gornjim izrazima izračunaju površine ispod Gaussove f.g.v. t.j. Gaussov integral $P(u_i)$. Kako je $P(H_{S,i})$ poznato iz empirijske raspodjele uzoraka razmatrane slučajne varijable $\hat{H}_S$ (Tablica: 3.1.1.6.3::I), to je poznato i $P(u_i)$ iz gornjih formula. Sada se nađu tabulirane vrijednosti " u_i " u tablici Tab. 4.5.1.4::III koje pripadaju tom gaussovom integralu

$$P(u_i) = \int_0^{u_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}u^2} du = \int_0^{u_i} p(u) du$$

kako je naznačeno na Sl. 3.1.1.6.3::4.



Sl. 3.1.1.6.3::4 Površina ispod Gaussovog integrala $P(u_i)$

Za konkretan slučaj
 $P(\hat{H}_s \geq H_{s,1}) = P(\hat{H}_s \geq 9,3) = 0,00177$ pa vrijedi :

$$P(u_i) = 0,5 - P(\hat{H}_s \geq H_{s,1}) = 0,5 - P(\hat{H}_s \geq 9,3) = 0,5 - 0,00177 = 0,49823$$

$$\ln 9,3 = 2,23.$$

Dalje tražimo vrijednost argumenta " u_1 " kojemu pripada integral preko $\frac{1}{2}$ Gaussove funkcije gustoće vjerojatnosti veličine 0,49823. Nju očitamo iz tablice Gaussovog integrala (Tablica 3.1.1.6.3::III):

$$u_1 = 2,915.$$

Vrijednost u_1 može se odrediti i pomoću EXCEL funkcije $\text{NORMSINV}[P(\hat{H}_s \geq H_{s,1})] = -\text{NORMSINV}(0,00177) = 2,9165$. Također se može obrnuto za $u_1 = 2,9165$ dobiti $P(\hat{H}_s \geq H_{s,i}) = \text{NORMSDIST}(-u_i) = \text{NORMSDIST}(-2,9165) = 0,00177$. Dalje se par $\ln H_{s,1} = \ln 9,3 = 2,23$ i $u_1 = 2,91$ nacrtaju na linearnim skalama " $\ln H_s$ " i " u ", te im se pridruže vrijednosti $H_{s,1} = 9,3$ i $P(\hat{H}_s \geq 9,3) = 0,00177$ (Sl. 3.1.1.6.3::2). Za par $H_{s,12} = 2,7$ [m] i $P(\hat{H}_s \geq H_{s,12}) = P(\hat{H}_s \geq 2,7) = 0,6909$; $P(u_{12}) = 0,6909 - 0,5 = 0,1909$, a iz Gaussove tablice $u_{12} = -0,5$. $\ln H_{s,12} = \ln 2,7 = 1$.

f) Kalibriranje pomoćne ordinate " $PR[\text{god}]$ "

Kalibracija na Sl. 3.1.1.6.3::1b izvedena je pomoću tablice 3.1.1.6.3::II, a ona se kreira kako slijedi. Na pr.:

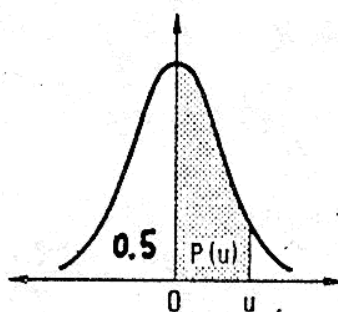
$$\text{Za } PR = 100g \rightarrow P(\hat{H}_s \geq H_s^{100g}) = \frac{T_{\text{reg}}}{n} \cdot \frac{1}{PR} = \frac{3}{3108} \cdot \frac{1}{100} = 9,65 \cdot 10^{-6}.$$

$$\text{Za } P(u) = \int_0^{u_i} p(u) du = 0,5 - 9,65 \cdot 10^{-6} = 0,49999035 \rightarrow u^{100g} = 4,27.$$

PR [god]	$P(H_s) = P(\hat{H}_s \geq H_{s,i})$	$P(u) = 0,5 - P(\hat{H}_s \geq H_s^{PP})$	u^{PR}
100	$9,65 \cdot 10^{-6}$	0,49999035	4,27
50	$1,93 \cdot 10^{-5}$	0,499981	4,12
20	$4,83 \cdot 10^{-5}$	0,499952	3,90
10	$9,65 \cdot 10^{-5}$	0,499904	3,73

Tablica 3.1.1.6.3::II Tablica za kalibriranje pomoćne ordinate povratnih razdoblja " $PR[\text{god}]$ "

Površine ispod normalne krivulje



$$P(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-\frac{1}{2}x^2} dx = \int_0^u p(u) du$$

TABLICA V

u	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0.00000	00399	00798	.01197	01595	01994	02392	02790	03188	03586
0,1	03983	04380	04776	05172	05567	05962	06356	06749	07142	07535
0,2	07926	08317	08706	09095	09483	09871	10257	10642	11026	11409
0,3	11791	12172	12552	12930	13307	13683	14058	14431	14803	15173
0,4	15542	15910	16276	16640	17003	17364	17724	18082	18439	18793
0,5	19146	19497	19847	20194	20540	20884	21226	21566	21904	22240
0,6	22575	22907	23237	23565	23891	24215	24537	24857	25175	25490
0,7	25804	26115	26424	26730	27035	27337	27637	27935	28230	28524
0,8	28814	29103	29389	29673	29955	30234	30511	30785	31057	31327
0,9	31594	31859	32121	32381	32639	32894	33147	33398	33646	33891
1,0	34134	34375	34614	34850	35083	35314	35543	35769	35993	36214
1,1	36433	36650	36864	37076	37286	37493	37698	37900	38100	38298
1,2	38493	38686	38877	39065	39251	39435	39617	39796	39973	40147
1,3	40320	40490	40658	40824	40988	41149	41309	41466	41621	41774
1,4	41924	42073	42220	42364	42507	42647	42786	42922	43056	43189
1,5	43319	43448	43574	43699	43822	43943	44062	44179	44295	44408
1,6	44520	44630	44738	44845	44950	45053	45154	45254	45352	45449
1,7	45543	45637	45728	45818	45907	45994	46080	46164	46246	46327
1,8	46407	46485	46562	46638	46712	46784	46856	46926	46995	47062
1,9	47128	47193	47257	47320	47381	47441	47500	47558	47615	47670
2,0	47725	47778	47831	47882	47932	47982	48030	48077	48124	48169
2,1	48214	48257	48300	48341	48382	48422	48461	48500	48537	48574
2,2	48610	48645	48679	48713	48745	48778	48809	48840	48870	48899
2,3	48928	48956	48983	49010	49036	49061	49086	49111	49134	49158
2,4	49180	49202	49224	49245	49266	49286	49305	49324	49343	49361
2,5	49379	49396	49413	49430	49446	49461	49477	49492	49506	49520
2,6	49534	49547	49560	49573	49585	49598	49609	49621	49632	49643
2,7	49653	49664	49674	49683	49693	49702	49711	49720	49728	49736
2,8	49744	49752	49760	49767	49774	49781	49788	49795	49801	49807
2,9	49813	49819	49825	49831	49836	49841	49846	49851	49856	49861
3,0	49865	49869	49874	49878	49882	49886	49889	49893	49897	49900
3,1	49903	49906	49910	49913	49916	49918	49921	49924	49926	49929
3,2	49931	49934	49936	49938	49940	49942	49944	49946	49948	49950
3,3	49952	49953	49955	49957	49958	49960	49961	49962	49964	49965
3,4	49966	49968	49969	49970	49971	49972	49973	49974	49975	49976
3,5	4997674									
4,0	4999683									
4,5	4999966									
5,0	0.49999713									

Svakoj vrijednosti u ovoj tablici prethodi decimalni zarez; tako je npr.: $P(1,71) = 0,45637$

Tablica 3.1.1.6.3::III Gaussov integral za normiranu normalnu raspodjelu $N[0,1]$

3.1.1.7 Projektni valovi

Osim poznatih kopnenih djelovanja na pomorske građevine javljaju se specijalni utjecaji koji proizlaze iz morskog okoliša, a to su morski valovi i morske razine. Kod nekih pomorskih građevina, ili njihovih konstrukcija, djelovanja morskog okoliša su čak dominantna. Stoga se pomorske građevine moraju na njih proračunati kako slijedi:

Proračuni pomorskih građevina mogu se provoditi s:

- projektnim valovima ili s
- projektnim spektrom. Ovdje će se dati samo projektni valovi.

Projektni valovi razlikuju se za slijedeće dvije su vrste proračuna pomorskih građevina:

- proračuni funkcionalnosti i
- proračuni konstrukcije.

Djelovanje morskog okoliša na pomorske građevine podrazumijeva ekstremna djelovanja, koja se definiraju projektnim povratnim razdobljem $PR=5, 50, 100$ ili više [god]. Valno djelovanje uobičajeno se definira *projektnom valnom visinom* (H_{proj}), koja je ovisna o vrsti proračuna i o tipu konstrukcije (Tab. 3.1.1.7::I). *Projektni valni period* (T_{proj}) nije propisan nego se određuje tako da se ispita djelovanje prikladnog raspona valnih perioda, a usvaja se onaj koji za razmatrani proračun daje najnepovoljnije efekte. Pri tome gruba je orijentacija da se funkcionalni proračuni provode za povratna razdoblja $PR \geq 5$ godina [2,3,5,15], a proračuni konstrukcije za povratna razdoblja $PR=50$ (EC) do 100 (BS) godina [1,2,3,4] (Tab. 3.1.1.7::I).

PROJEKTNI VAL prognozirani (ili u rijetkim slučajevima izmjerni)				
FUNKCIONALNOST GRAĐEVINE			PRORAČUN KONSTRUKCIJE	
1. AGITACIJA BAZENA (PREKRCAJNI DANI)	$H_{1/3}^{5\text{ god}}$	VAL 5- GODIŠNJEG POVRATNOG RAZDOBLJA	1. NASIPNE GRAĐEVINE (fleksibilne konstrukcije)	$H_{1/10}^{100\text{ god}}$
2. PRELJEVANJE ¹⁾	$H_{\max}^{5\text{ god}}$		2. VERTIKALNE STIJENE (krute konstrukcije)	$H_{\max}^{100\text{ god}}$
	$H_{\max}^{100\text{ god}}$		3. GRAĐEVINE NA PILOTIMA (krute konstrukcije)	

Tab. 3.1.1.7::I Izbor projektne valne visine H_{proj} u ovisnosti o vrsti proračuna i tipu građevine [2,3,13,14]. 1) Projektna valna visina za prelijevanje ovdje se preporuča s $H_{proj}=H_{\max}^{5\text{ god}}$ što principijelno vrijedi za kej; t.j. visinu teritorija u luci i visinu krune lukobrana teretnih luka kod kojih se, u slučaju većih valova, može kontrolirati i zabraniti prolaz ljudi kako nebi stradali [6]. Kod javnih luka gdje se promet pješaka ne može kontrolirati [6] projektna valna visina za prelijevanje je $H_{proj}=H_{\max}^{100\text{ god}}$. Ova projektna valna visina vrijedi i za prelijevanje nasipnog lukobrana, jer se stabilnost obloge pokosa na lučkoj strani lukobrana u principu računa pod pretpostavkom nepreljevanja. Tablica je autorska interpretacija literature.

Proračuni funkcionalnosti - agitacija lučkog bazena i prekrcajni dani - pomorskih građevina provode se u principu za niže vrijednosti djelovanja morskog okoliša ($PR \geq 5[\text{god}]$) nego li proračuni konstrukcija ($PR=50$ do $100[\text{god}]$), jer se u proračunskom radnom vijeku građevine može dopustiti da ona nekoliko puta ne funkcionira. Naime tada će se desiti prihvatljiva i popravljiva šteta, neće biti ljudskih žrtava a s druge strane početna investicija će biti manja. Ni o tu ima razlika: standardni proračun funkcionalnosti – prelijevanje - provodi se za $PR=5$ do $100 [\text{god}]$, a za specijalne građevine i do $10.000[\text{god}]$ sukladno Tab. 3.1.1.7::II

SVRHA GRAĐEVINE I VRSTA OPASNOSTI	PRORAČUNSKI UPORABNI VIJEK GRAĐEVINE	RAZINA ZAŠTITE
	LT[<i>god</i>]	PR[<i>god</i>]
Privremena ili kratkotrajna mjera	1 - 20	5 – 50
Većina obrambenih građevina i obaloutvrda	30 - 70	50 – 100
Protupoplavne građevine koje štite velike rizične prostore	50 - 100	100 – 10.000
Specijalne građevine, visoki troškovi gradnje	200	do 10.000
Nuklearne elektrane i sl.	-	10.000

Tab. 3.1.1.7::II Primjeri preporučenih razina zaštite od prelijevanja valovima u funkciji povratnih razdoblja,
[15] *EurOtop,30*

Za usporedbi u UK obrana od preplavlivanja morem građevina velikog rizika određuje se za $PR=1.000[\text{god}]$, a srednjeg rizika $PR=200$ do $1.000[\text{god}]$. No mnoge postojeće građevine ne nude zaštitu u skladu s tim aktualnim propisima. Poznati primjer za zaštitu od ekstremnih plima su polderi u Nizozemskoj čijih je 2/3 površine ispod takvih plima. Kod toga gusto naseljene seoske površine imaju zaštitu za $PR=10.000[\text{god}]$, manje guste za $PR=4.000[\text{god}]$. Zaštita od riječnih poplava (bez uzimanja u obzir ekstremne plime) je za $PR=1.250[\text{god}]$. Proračunski radni vijek nasipa za obranu od poplava koji se lako daju nadvisiti je u Nizozemskoj $LT=50[\text{god}]$. U urbanim područjima gdje je nasipe teže nadvisiti $LT=100[\text{god}]$. To može biti i više za vrlo skupe specijalne građevine kao što su plimna pregrada na istočnoj Šeldi Temzi ili Maeslandtkerring na ulazu u Rotterdam kada je $LT=200[\text{god}]$. [15] *EurOtop,30*, Nije vezano za more i valove, ali je slična filozofija primijenjena za savski nasip u Zagrebu koji je dimenzioniran za protok $PR=1.000[\text{god}]$.

Kriteriji za količinu (protok) prelijevanja dani su u Tab. 3.1.1.7::III, a neki kriteriji agitacije lučkog bazena, vezani za probleme koji stvaraju valovi kod prekrcaja tereta i manevara broda u luci, dani su okvirno u Tab. 3.1.1.7::IV i precizno u Tab. 4.6::V.

Proračuni konstrukcije pomorskih građevina provode se za više vrijednosti djelovanja morskog okoliša (za $PR=50-100[\text{god}]$), jer se u proračunskom radnom vijeku građevine ne može dopustiti da ona ima veliku vjerojatnost loma ili velikog oštećenja. Tada bi bile moguće ljudske žrtve, a sigurno će se desiti velika financijska šteta. No za građevine čije bi nefunkcioniranje ili lom ugrozili široku društvenu zajednicu projektno

povratno razdoblje je veće od 100 godina. U svakom slučaju projektno povratno razdoblje za proračun konstrukcije jednako je ili veće od proračunskog radnog vijeka građevine: $PR[god] \geq LT[god]$, [2,1996].

Kriteriji za proračune konstrukcije definirani su EUROCODE-om kao princip da proračunski učinci djelovanja moraju biti $\leq$ proračunskih učinaka stabilizacijskih djelovanja, od proračunske otpornosti konstrukcije projektne vrijednosti uporabnog ograničenja konstrukcije.

m³/s/m'	PROMETNA SIGURNOST		SIGURNOST KONSTRUKCIJE			l/s/m'
2,E-01	nesigurno kod svih brzina	vrlo opasno	konstruktivna oštećenja	oštećenja čak iako je potpuno obložen	oštećenja čak iako je hodnik popločen	200
5,E-02					oštećenja ako hodnik nije popločen	50
2,E-02				oštećenje kod neobloženog nutarnjeg pokosa	bez oštećenja	20
1,E-02						10
2,E-03				oštećenje kod neobložene krune		2
1,E-03						1
5,E-04				bez oštećenja		opasno: travnati nasip i kompoz. vert. kej
4,E-04	0,4					
1,E-04	nesigurno na vertikalnom lukobranu	0,1				
3,E-05		nesigurno parkiranje na kompozitnom vert. keju	0,03			
2,E-05			0,02			
1,E-06	nekonformno, ali bezopasno		0,001			
4,E-05		malena oštećenja opreme	0,04			
1,E-06	vlažno, ali gotovo konformno		bez oštećenja		0,001	
1,E-07		sigurna vožnja kod svih brzina			0,0001	
	VOZILA	PJESACI	KUCE		NASIPNI LUKOBRAN	NASIPNE OBALOUTVRDE

Tab. 3.1.1.7::III Kriteriji za prelijevanje [6,12]

POSTUPCI	BRODOVI [dwt]	ZNAČAJNA VALNA VISINA [m]	PROSJEČNA GODIŠNJA UČESTALOST [dana/god]
Prilaz ulazu u luku [11]	Svi	3.0	19
Manevriranje unutar luke [11]	Svi	1.5	8
Pristajanje [11]	do 60 000	0.8	24
	od 60 000 do 125 000	1.0	14
	od 125 000 do 250 000	1.5	8
Ukrcaj rasutog tereta [11]	do 60 000	1.5	8
	od 60 000 do 125 000	2.0	4
Iskrcaj rasutog tereta [11]	do 60 000	0.8	24
	od 60 000 do 125 000	1.0	14
	od 125 000 do 250 000	1.5	8
Prekrcaj generalnog tereta [11]	do 20 000	0.5	30
Marine [7,14]	Svi	0.15	5
Dopuštena stanja valovlja unutar akvatorija marine s plutajućim gatovima [5]	Svi	0.3	1dan/5 god
	Svi	0.5	1dan/50 god

Tab. 3.1.1.7::IV Orijentacijske granične valne visine usvojene za razne operacije kod uplovljavanja i prekrcanja brodova u luci i marini [5,7,11,14]

Djelovanje morskog okoliša na pomorske građevine izraženo preko projektnog PR[god] u odnosu na proračunski radni vijek građevine LT[god] definira *rizikom* R[%] gubitka funkcije, oštećenja ili sloma građevine.

Ship Type	Cargo Handling Equipment	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Yaw (°)	Pitch (°)	Roll (°)
Fishing vessels	Elevator crane	0.15	0.15				
	Lift-on-lift-off	1.0	1.0	0.4	3	3	3
	suction pump	2.0	1.0				
Freighters, coasters	Ship's gear	1.0	1.2	0.6	1	1	2
	Quarry cranes	1.0	1.2	0.8	2	1	3
Ferries, Ro-Ro	Side ramp ²	0.6	0.6	0.6	1	1	2
	Dew/storm ramp	0.8	0.6	0.8	1	1	4
	linkspan	0.4	0.6	0.8	3	2	4
	Rail ramp	0.1	0.1	0.4	-	1	1
General cargo	-	2.0	1.5	1.0	3	2	5
Container vessels	100% efficiency	1.0	0.6	0.8	1	1	3
	50% efficiency	2.0	1.2	1.2	1.5	2	6
Bulk carriers	Cranes	2.0	1.0	1.0	2	2	6
	Elevator/ bucket-wheel	1.0	0.5	1.0	2	2	2
	Conveyor belt	5.0	2.5		3		
Oil tankers	Loading arms	3.0 ³	3.0				
Gas tankers	Loading arms	2.0	2.0		2	2	2

Remarks: ¹⁾ Motions refer to peak-peak values (except for sway: zero-peak).
²⁾ Ramps equipped with rollers.
³⁾ For exposed locations 5.0 m (regular loading arms allow large movements)

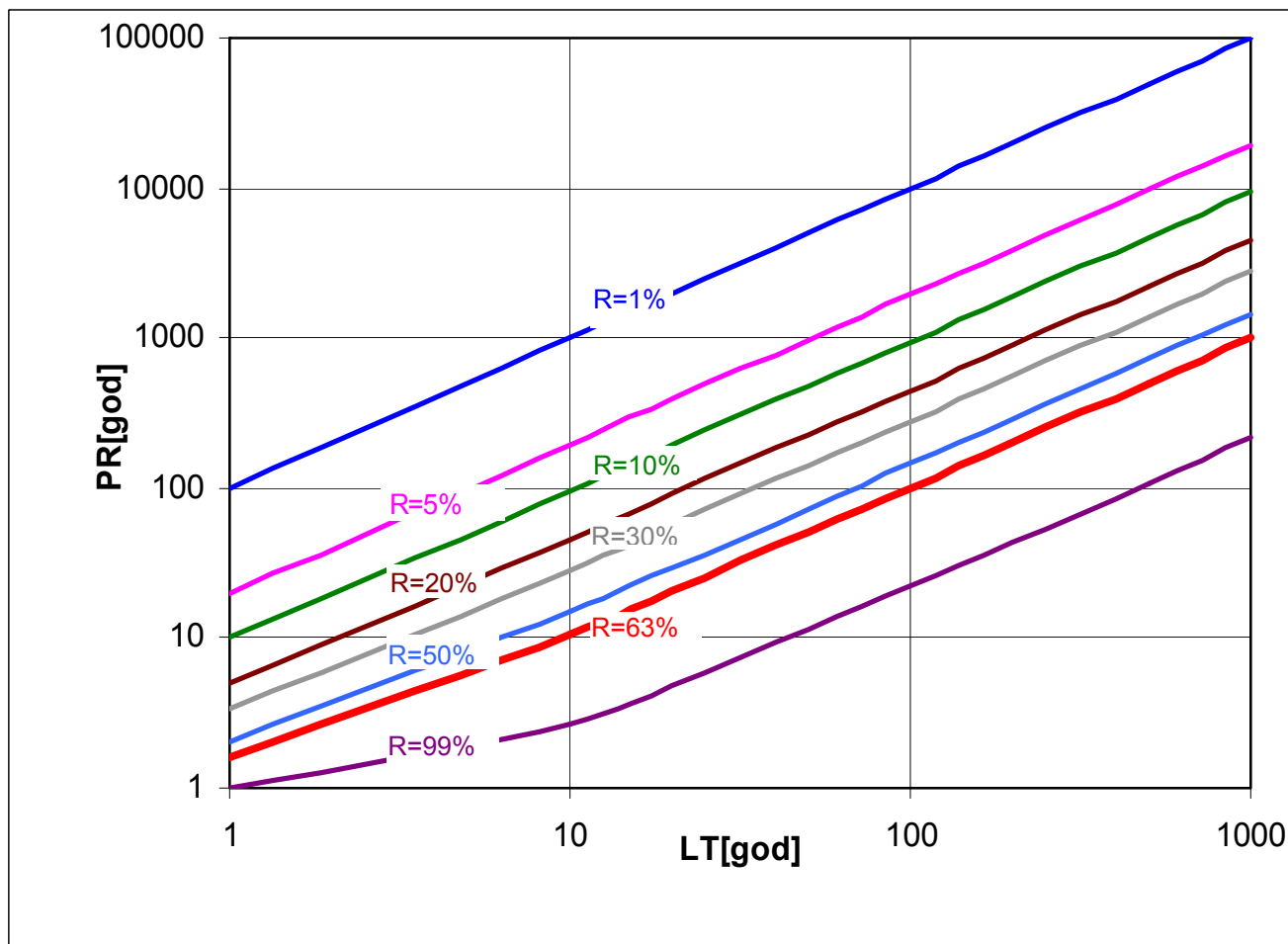
Tab. 3.1.1.7::V PIANC preporuka kriterija gibanja broda za sigurno obavljanje prekrcanja [7,14]

Rizik gubitka funkcije, oštećenja ili sloma građevine definira se kao vjerojatnost izlaganja konstrukcije projektnom djelovanju (na pr. valnoj visini $H \geq H^{\text{proj}}$) definiranog povratnog razdoblja $PR[\text{god}]$, ili težim od njega, u proračunskom radnom vijeku konstrukcije $LT[\text{god}]$. Kako je prikazano u [10] izvodi se iz vjerojatnosti premašenja slučajne varijable ekstrema valnih parametara kao:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{PR}\right)^{LT} \quad \forall \quad LT > 1$$

gdje je:

$R[1^\circ \text{ ili } \%]$	rizik izlaganja građevine projektnim uvjetima i težim od njih
$PR[\text{god}]$	povratno razdoblje razmatranog djelovanja na građevinu
$LT[\text{god}]$	živorni vijek građevine,



Sl. 3.1.1.7::1 Odnos rizika s povratnim periodom i proračunskim radnim vijekom konstrukcije ili obratno:

$$PR = \frac{1}{1 - e^{-\frac{\ln(1-R)}{LT}}}$$

Obje veličine se, prema Borgmanu [10], mogu izvesti na dva načina: preko analize slučajne varijable godišnjih ekstrema (vidi gore) i preko statističkog modeliranja ekstrema razmatranog fizikalnog procesa uz Poissonovu distribuciju.

Prema drugom principu rizik se izvodi, uz pomoć Poissonove distribucije, iz vjerojatnosti da se neki događaj male vjerojatnosti u okviru više mogućnosti pojavi 1 puta :

$$R = 1 - e^{-\frac{LT}{PR}} \quad \forall \quad LT \gg 1$$

$$PR = -\frac{LT}{\ln(1-R)}$$

privremene građevine	1-5
instalacije	15-25
fiksne pomorske građevine	50

Tab. 3.1.1.7::VI Preporučeni proračunski radni vijek građevina [2,8,14]

Odnos rizika s povratnim periodom i proračunskim radnim vijekom konstrukcije je dan na Sl. 3.1.1.7::1. Pritom je preporučeni proračunski radni vijek dan u Tab. 3.1.1.7::II i VI. Na Sl. 3.1.1.7::1 se vidi da je rizik oštećenja ili sloma građevine u slučaju da su proračunski radni vijek i povratno razdoblje projektnog djelovanja jednaki $LT=PR$ vrlo velik i iznosi 63%!

Prihvatljivi rizik definira se preko zakonski propisanog povratnog razdoblja $PR[\text{god}]$, ili težeg od njega, u zakonski propisanoj proračunskoj radnoj vijeku konstrukcije $LT[\text{god}]$. Tako najčešći prihvatljivi rizik za $PR=100[\text{god}]$ i $LT=50[\text{god}]$ iznosi $R=39,3\%$, a za specijalne objekte s $PR=10.000[\text{god}]$ i $LT=200[\text{god}]$ iznosi $R=2\%$.

Literatura uz poglavlje 3

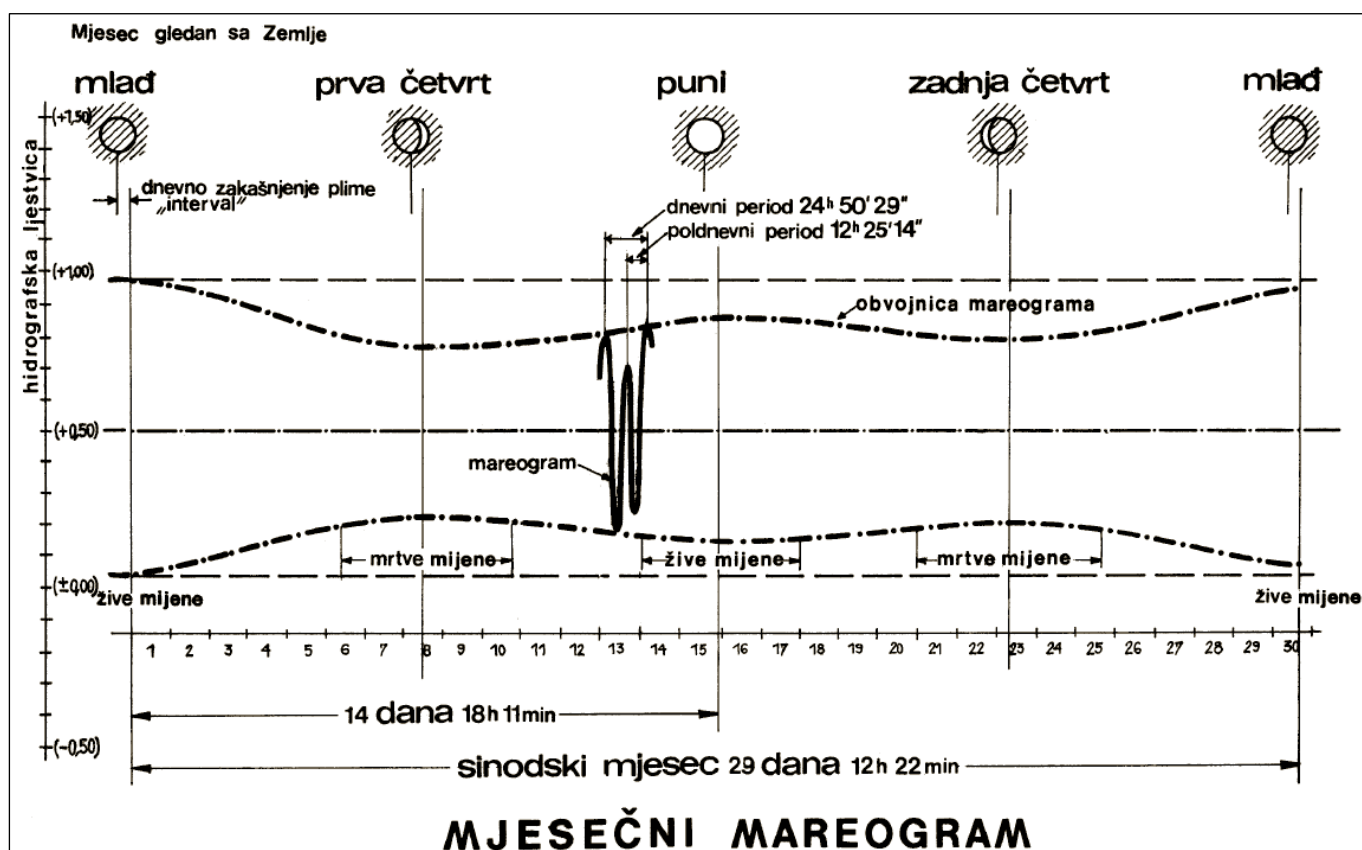
- [1] CERC: Shore protection Manual. Vol I 2. ed. Washington D. C.: US Army Corps of Engineers - Coastal Engineering Research Center, 1984.
- [2] WMO: Handbook on Wave Analysis and Forecasting. WMO-No.446. Geneva: World Meteorological Organization, 1976. Str. 70
- [3] Bretschneider, C. L.: Revisions in Wave Forecasting. - Deep and Shallow Water. In: Proceedings of the Sixth Conference on Coastal Engineering - Council on Wave Research, New York: ASCE, 1959.
- [4] Darbyshire, M.; Draper, L.: Forecasting Wind-Generated Sea Waves. In.: Engineering (London) Nr.195 (April 1963): 482 - 484
- [5] Groen, P.; Dorrenstein, R.; Zeegolven. In.: Koninklijk Neederlands Meteorologisch Institut, Opstellen op Oceanographisch en Maritiem Meteorologisch Gebied no.11 1958
- [6] Donelan, M.A.: Similarity Theory Applied to the Forecasting of Wave Heights, Periods and Directions. In.: Proceedings of the Canadian Coastal Conference, 1980: National Research Council Canada, 1980. p. 47-61
- [7] Pierson, W.J.jr.; Neumann, g.; James, R.W.: Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics. In.: Publication No 603. .Washington D.C.: US Navy Hydrographic Office, 1955
- [8] Hasselaann, K.; Ross, D.B. Müller, P.; Sell, W.: A Parametric Wave Prediction Model. In.: Journal of Physical Oceanography, Vol. 6 (1976.): 200-228
- [9] Nordenström, N.: A Method to Predict Long Term Distributions of Waves and Wave-Induced Motions and Loads on Ships and Other Floating Structures. In.: Publication No. 81. Oslo: Det Norske Veritas. April 1973.
- [10] Tucker, J.: Analysis of Record of Sea Waves. In.: Proceedings of the Institution of Civil Engineers Vol. 26 (1963.) paper No. 6691: 305-316
- [11] Silvester, R.: Coastal Engineering, 1. Amsterdam: Elsevir Scientific Publication Comp. 1974. -p. 256-269
- [12] WMO: Guide to Meteorological Instruments and Observing Practices. WMO Publications No. 8 TP.3.: World Meteorological Organization
- [13] Cartwright, D.C.: A Comparison of Instrumental and Visually Estimated Wave Heights and Periods Recorded on Ocean Weather Ships. In.: The presentation of wave data from voluntary observing ships, Hogben, N.; Lamb, F.E. (GB): National Physical Laboratory, SHIP REF. 49 (1964)
- [14] Pierson, W.J.; Moskowitz, L.: A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S.A. Kitaigoriskij. In.: Journal of the Geophysical Research (USA) Vol 69 (1964) No. 24: 5181-5190
- [15] ITTC: Technical Decizioni and Recommendations Of the Seakeeping Comitee. In.: Proceedings 12. i 13. ITTC, 1969. Rim i 1972. Berlin
- [16] Hasselmann, K.; i drugi: Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). In.: Deutsche hydrographische Zeitschrift, reihe A(8°) (1973.) No.12
- [17] Chakrabarti, K.S.: Hydrodynamics of Offshore Structures. Southampton: Computational Mechanics Publications, 1987. -Str. 102-125

- [18] Tabain, T.: Predskazivanje valjanja malih brodova pri istovremenom djelovanju nepravilnih valova i vjetra. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. Doktorska disertacija obranjena 1985.
- [19] Smirčić, A.; Gačić, M.: Parametarska aproksimacija spektra površinskih valova srednjeg Jadrana . U.: Alpex-rezultati, simpozij Dinamika vjetra i strujanja u sjevernom Jadranu, Split, Juni 1983. Split: Savezni HMZ Beograd i Institut za oceanografiju i ribarstvo Split, 1983.
- [20] Pršić, M.: Optimalizacija konstrukcije lukobrana u uvjetima jadranskog valnog spektra, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet građevinskih znanosti. Doktorska disertacija obranjena 1987. -Str. 189
- [21] ITTC: Proceedings of the 17th International Towing Tank Conference, Leningrad, September 1984.: ITTC, 1984
- [22] Hasselman, S.; i drugi: The WAM model - a Third Generation Ocean Wave Prediction Model. In.: Journal of Physical Oceanography, Vol 18(1988.): Str. 1775-1810
- [23] an Mörkerken, R.A.; Komen, G.J.; Janssen, P.A.E.m. In: Operational WAMS statistics over the period December 1986 - March 1987. In.: KNMI Tech. Rept. TR-114, 1989.
- [24] Zambresky, L.: A verifikation study of the global WAM mode,I December 1987 - November 1988. In.: ECMWF Tech. Rept. 63 (may 1989)
- [25] Riepma, H.W.; Bouws, E.: Preliminary results of the NEDWAM model. In.: Preprints of Second International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Vancouver B.C., april 1989. Downsview: Published by Environment Canada AES, 4905 Dufferin St. Downsview, Ontario, Canada
- [26] Tolman, H.L.: The numerical WAVEWATCH: A third generation model for hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. In.: Rept No. 89-2. Delft: Dept. of Civil Eng., Delft University of Technology, 1989.
- [27] Kuspilić, N.: Prognoze vjetrovnih valova na području sjevernog Jadrana. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet građevinskih znanosti. Magistarski rad obranjen aprila 1988.
- [28] CEM - Coastal Engineering Manual: U.S Army Corps of Engineers"; Index; Part II: Coastal Hydrodynamics
- [29] Pršić, M.: Prognoze vjetrovnih valova, Vodoprivreda, Beograd, 1991.
- [30] Simiu, E.; Scanlan, R. H.: Wind Effects on Structures – An Introduction to Wind Engineering, Second edition, John Wiley / Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1986.

3.2 REALNI MORSKI VALOVI DUGIH PERIODA

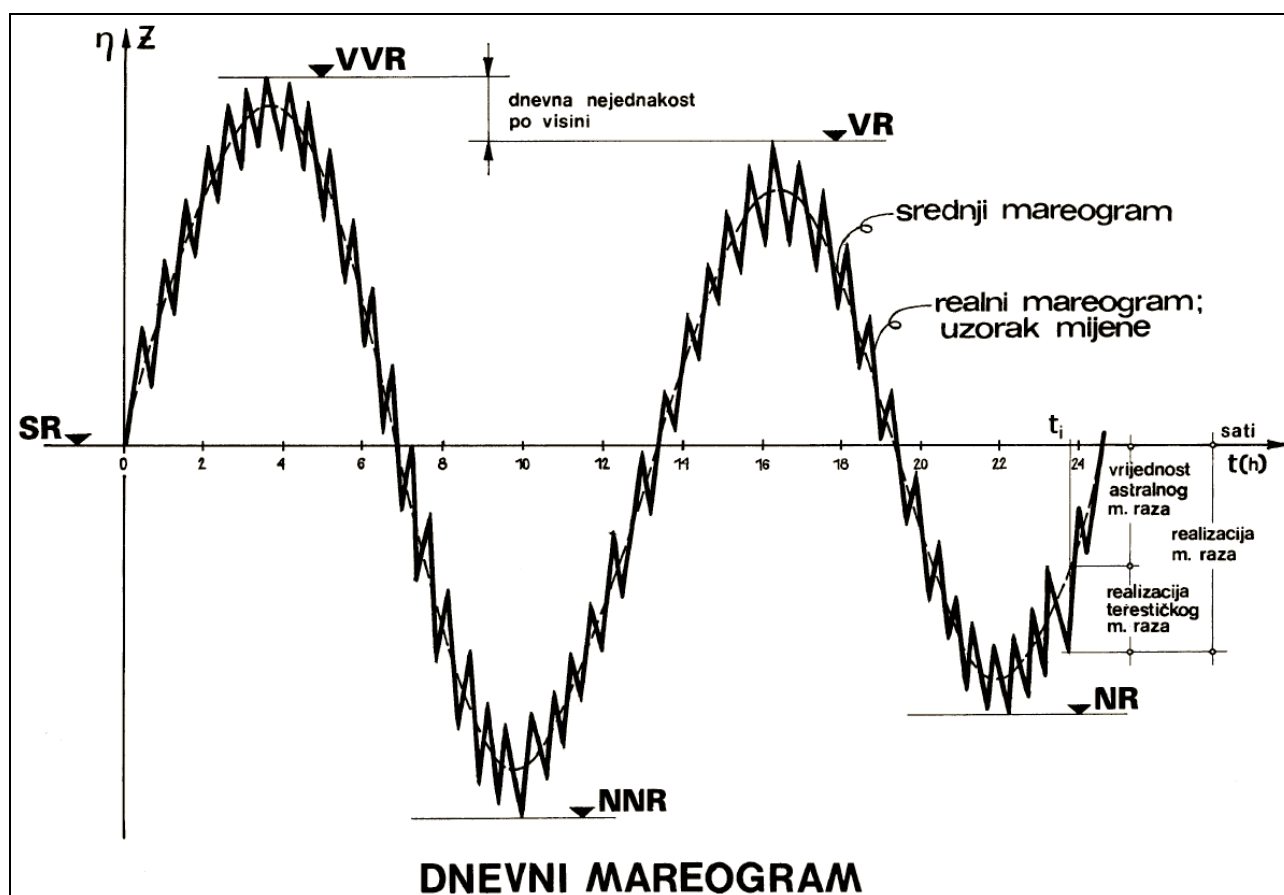
Pojam morske razine odnosi se na nivo fizičke površine mora koji je u relaciji s nekom referentnom ravninom. Ekstremne morske razine su, uz valove, osnovna podloga za sve vrste inženjerskih zahvata u moru.

Morska razina se javlja u jednom trajnom dugovalnom procesu nazvanom morska mijena. Dvije su glavne grupe valnih komponenti koje formiraju duge valove morske mijene: 1) astralna, koja se naziva morskdo doba (generirana gibanjem nebeskih tijela – pretežno Mjeseca i Sunca - s periodom od oko $\frac{1}{2}$ ili oko 1 dan) i 2) terestička (generirana zemaljskim utjecajima s periodom od 10-tak minuta do nekoliko sati). Astralna komponenta morske mijene se može okarakterizirati kao deterministička, a terestička kao slučajan proces, što cijeloj morskoj mijeni daje karakter slučajnog procesa.



Sl.3.2::1 Mjesečni mareogram

Amplituda mijene varira u tokom jednog mjeseca. Period mjesečne varijacije morske mijene je pola sinodskog mjeseca ($0,5 \times 29,5$ dana) Sl.3.2::1. No varira i tokom dana. Na slici3.2::2 prikazana je dnevna varijacija morske mijene, koja se može javiti s jednim ili dva perioda. Jednodnevna mijena ima period 24 sata i 50 minuta, a poludnevna 12 sati i 25 minuta. Mijene na Jadranu su poludnevnog tipa u vrijeme sizigija (mlađ i pun mjesec), a jednodnevnog tipa u vrijeme kvadrature (prva i zadnja četvrt). U tablici3.2::I dana je nomenklatura morskih razina s oznakama i definicijama karakterističnih morskih razina.



Sl.3.2::2 Dnevni mareogram

NOMENKLATURA MORSKIH RAZINA

ExtrVR ^{100g}	Ekstremno Visoka Razina 100 g povratnog razdoblja, odnosno maksimalna razina koja 1 puta u 100 godina može biti dostignuta ili premašena
ExtrVR ^{50g}	Ekstremno Visoka Razina 50 g povratnog razdoblja, odnosno maksimalna razina koja 1 puta u 50 godina može biti dostignuta ili premašena
ExtrVR ^{10g}	Ekstremno Visoka Razina 10 g povratnog razdoblja, odnosno maksimalna razina koja 1 puta u 10 godina može biti dostignuta ili premašena
SVVŽR	Srednja Viša Visoka živa Razina – 20-godišnji prosjek od po jedne maksimalne registrirane više visoke razine u vrijeme žive mijene s izgladenog moreograma
SVVR	Srednja Viša Visoka Razina – prosjek od svih registriranih viših visokih razina u nekom periodu s izgladenog moreograma
SVR	Srednja Visoka Razina – prosjek od svih registriranih visokih razina nekog razdoblja s izgladenog moreograma
SR ±0,0	Srednja Razina $\equiv$ geodetska nula $\pm 0,0$ [m n.m.], ili nula generalnog nivelmana države – prosjek registriranih satnih razina s izgladenog moreograma ili integralni prosjek; ako se radi o barem 20-godišnjem prosjeku može poslužiti za nulu generalnog nivelmana države: $\pm 0,0$ [m n.m.]. Za to se odabere jedna mareografska stanica na državnoj obali. Za Hrvatsku je geodetska nula $\pm 0,0$ [m n.m.] definirana 1875. iz jednogodišnjeg opažanja u Trstu. Za usporedbu 20-godišnjia SR u Bakru je cca $+0,1$ [m] niža .
SNR	Srednja Niska Razina – prosjek od svih registriranih niskih razina nekog perioda s izgladenog moreograma
SNNR	Srednja Niža Niska Razina – prosjek od svih registriranih nižih niskih razina u nekom periodu s izgladenog moreograma
SNNŽR [±0,0]	Srednja Niža Niska živa Razina $\equiv$ hidrografska nula $\equiv$ nula pomorskih karata ili – 20-godišnji prosjek od po jedne minimalne registrirane niže niske razine u vrijeme žive mijene. Hidrografska nula se mijenja uzduž obale, pa stoga nije istovjetna za sve pomorske karte

ExtrNR ^{10g}	Ekstremno Niska Razina 10 g povratnog razdoblja, odnosno minimalna razina koja 1 puta u 10 godina može biti dostignuta ili podbačena
ExtrNR ^{50g}	Ekstremno Niska Razina 50 g povratnog razdoblja, odnosno minimalna razina koja 1 puta u 50 godina može biti dostignuta ili podbačena
ExtrNR ^{100g}	Ekstremno Niska Razina 100 g povratnog razdoblja, odnosno minimalna razina koja 1 puta u 100 godina može biti dostignuta ili podbačena

Tab.3.2.:I Nomenklatura morskih razina