

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Andrea Farkas  
Usporedna analiza statističkih značajki valova  
srednjega i sjevernoga Jadrana

Zagreb, 2016.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za brodogradnju i morsku tehniku na Fakultetu strojarstva i brodogradnje pod vodstvom prof. dr. sc. Joška Parunova i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2015/2016

---

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
1. Uvod .....	1
2. WorldWaves atlas .....	4
3. Metodologija statističke analize valova .....	6
3.1. Rubna razdioba značajnih valnih visina.....	6
3.2. Uvjetna razdioba nultih valnih perioda.....	10
3.3. Veza između brzine vjetra i značajne valne visine vjetrovnih valova te veza između dominantnoga perioda i značajne valne visine .....	11
3.4. Ekstremna stanja mora .....	12
3.5. Usporedba s Tabainovim spektrom valova .....	13
4. Rezultati statističke analize.....	14
4.1. Tablica stanja mora .....	14
4.2. Weibull-ova tropametarska razdioba značajnih valnih visina .....	16
4.3. Logaritamsko – normalna razdioba vršnih perioda.....	17
4.4. Veza između brzine vjetra i značajne valne visine vjetrom generiranih valova .....	18
4.5. Veza između dominantnoga perioda i značajne valne visine .....	19
4.6. Proračun ekstremnih stanja mora .....	20
4.7. Ovisnost vršne spektralne frekvencije i značajne valne visine .....	20
5. Komparativna analiza rezultata .....	21
5.1. Komparativna analiza tablica stanja mora .....	21
5.2. Komparativna analiza ekstremnih stanja mora .....	22
5.3. Analiza ovisnosti spektralne vršne frekvencije i značajne valne visine .....	24
6. Zaključak .....	24
7. Zahvale .....	26
8. Literatura.....	27
9. Sažetak.....	29
10. Summary.....	30

---

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Mrežne točke i satelitske putanje u Jadranskom moru.....	5
Slika 2.	Familija Tabainovih spektara valova .....	7
Slika 3.	Položaj lokacija A i B u Jadranskom moru .....	14
Slika 4.	Usporedba izmjerenih frekvencija i teoretske funkcije distribucije za lokaciju A (lijevo) i lokaciju B (desno) te prikaz prilagodbe teoretske funkcije distribucije .	17
Slika 5.	Usporedba izmjerenih i teoretskih učestalosti vršnih perioda za lokaciju A (lijevo) i lokaciju B (desno) .....	18
Slika 6.	Veza između značajne valne visine vjetrom generiranih valova i brzine vjetra za lokaciju A (lijevo) i lokaciju B (desno).....	18
Slika 7.	Međusobna zavisnost očekivanoga valnog perioda i značajne valne visine za lokacije A i B.....	19
Slika 8.	Ekperimentalna i teorijska veza između vršne frekvencije spektra i značajne valne visine za lokaciju A (lijevo) i lokaciju B (desno) .....	21
Slika 9.	Usporedba značajnih valnih visina ekstremnih stanja mora dobivenih za lokacije A i B i ekstremnih stanja mora iz [27] .....	23

---

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Dostupni parametri .....	5
Tablica 2. Tablica stanja mora za lokaciju A .....	15
Tablica 3. Tablica stanja mora za lokaciju B .....	16
Tablica 4. Weibull-ovi parametri .....	16
Tablica 5. Najvjerojatnija ekstremna stanja mora .....	20

---

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$a$		Nagib pravca
$b$		Odsječak pravca na ordinati
$c$		Stanje krcanja broda
$f$		Funkcija gustoće vjerojatnosti
$F$		Funkcija distribucije
$f_i$		i-ta vrijednost predviđene vrijednosti
$f_j$		Učestalost pojavljivanja j-toga razreda značajne valne visine
$h$	m	Valna visina
$H_s$	m	Značajna valna visina
$H_s^E$	m	Ekstremna značajna valna visina
$H_s^{PP}$	m	Značajna valna visina nekoga povratnog perioda
$H_{sW}$	m	Značajna valna visina vjetrovnoga vala
$m_0$		Spektralni moment nultoga reda
$m_i$		Kumulativna relativna učestalost
$N$		Opseg uzorka
$PP$	godine	Povratni period
$Q$		Vjerojatnost premašivanja
$Q_L$		Vjerojatnost premašivanja dugoročnoga stanja mora
$Q_S$		Vjerojatnost premašivanja kratkoročnoga stanja mora
$R^2$		Koeficijent determinacije
$S(\omega)$		Spektar valova
$SS_{res}$		Rezidualna suma kvadrata odstupanja
$SS_{tot}$		Ukupna suma kvadrata
$T_p$	s	Vršni period
$T_{REG}$	godine	Razdoblje neprekidnoga opažanja
$T_z$	s	Nulti valni period
$v$	m/s	Brzina napredovanja broda
$v_w$	m/s	Brzina vjetra izmjerena na visini 10 m
$y_i$		i-ta vrijednost skupa podataka
$\alpha$		Weibull-ov parametar oblika
$\varepsilon$		Weibull-ov lokacijski parametar
$\theta$		Weibull-ov parametar skaliranja
$\vartheta$	°	Kursni kut
$\mu_{\ln T_z}$		Srednja vrijednost logaritmiranih vrijednosti nultih valnih perioda
$\mu_{T_z}$	s	Srednja vrijednost nultih valnih perioda
$\sigma^2$		Varijanca procesa

---

$\sigma_{\ln T_z}$		Standardna devijacija logaritmiranih vrijednosti nultih valnih perioda
$\sigma_{T_z}$	s	Standardna devijacija nultih valnih perioda
$\omega$	rad/s	Kružna frekvencija
$\omega_m$	rad/s	Modalna (vršna) frekvencija
$\Phi$		Funkcija razdiobe jedinične (standardne) normalne razdiobe

## 1. Uvod

Poznavanje statističkih značajki valova uzburkanoga mora u određenom akvatoriju od ključne je važnosti za sve aktivnosti vezane uz pomorski sektor, primjerice instalacije objekata morske tehnike, uređaja za pretvorbu energije vjetra i valova, objekata marikulture te posebno za projektiranje broda, planiranje brodskih ruta, upravljanje brodovima itd. [1]. Elevacija valovite morske površine može se opisati preko više parametara za svaki pojedini val (npr. valna visina, valni period, valna duljina i valna strmina). Kako je valna elevacija stohastičke naravi, ključno je pronaći pouzdane statističke modele koji će dati vjerodostojne procjene parametara potrebnih za opis valova, kao i odgovarajuću procjenu nesigurnosti takvih predviđanja. Stoga je definiranje teoretskih distribucija vjerojatnosti visina valova, kao i združena razdioba vjerojatnosti značajnih valnih visina i nultih valnih perioda, od velike pomoći i koristi inženjerima brodogradnje, pomorske tehnike i građevinarstva.

Određivanje vjerojatnosti premašivanja određene valne visine odavno je prepoznato kao važan element u projektiranju i procjeni sigurnosti pomorskih konstrukcija [2]. Npr., određivanje ekstremnih valnih momenata savijanja za koje se očekuje da djeluju na brodsku konstrukciju tijekom njenoga vijeka trajanja, najvažniji je faktor za dimenzioniranje momenta otpora brodske trupa. Dvije su metode na raspolaganju za procjenu ekstremnoga valnog opterećenja, a to su konstrukcija dugoročne distribucije valnih momenata savijanja i metoda ekstremnoga stanja mora. Dugoročna distribucija valnih momenata savijanja dobiva se množenjem kratkoročnih odziva s vjerojatnošću pojavljivanja određenoga stanja mora, a za ekstremno stanje mora u kojem se očekuje da se brod može naći računa se odziv, te se prema tako određenom ekstremnom odzivu projektira brodski trup. Najvažniji element za obje metode je odabir tablice stanja mora. Tablica stanja mora predstavlja vjerojatnost pojavljivanja određenoga stanja mora definiranoga značajnom valnom visinom te prosječnim periodom presijecanja razine mirne vodene površine [3]. Statistika valnih parametara temelji se na podacima prikupljenim vizualnim opažanjima s brodova, mjerenjima valografskim plutačama, numeričkim modelima morskoga okruženja i podacima dobivenim satelitskim snimcima.

Probabilistički opis stanja mora koristi se i u analizi pomorstvenosti brodova. Ovo je osobito važno kod sigurnosti ili udobnosti putovanja RO-RO brodova, trajekata i manjih brodova. Primjerice, Direktiva 2003/25/EC Europskoga i Vijeća 14. travnja 2003 godine o posebnim kriterijima stabilneta za RO-RO putničke brodove zahtjeva izglađen i pouzdan



probabilistički opis stanja mora u obalnim morima, a sve u svrhu odluke je li potrebno naknadno opremanje postojećih brodova. Vrijednosti značajnih valnih visina relevantne za primjenu ove direktive uzimaju se kao one vrijednosti valnih visina koje neće biti premašene s vjerojatnošću većom od 10%. Ova direktiva zahtjeva zadovoljenje kriterija stabiliteta RO-RO brodova ukoliko se pretpostavi određena visina nakupljene morske vode na prvoj palubi iznad vodne linije. Važno je napomenuti da ukoliko je vrijednost značajne valne visine koja neće biti premašena s vjerojatnošću većom od 10% manja od 1.5 m, visina nakupljene vode na prvoj palubi iznad vodne linije može se uzeti kao 0 m [4]. Najčešće brodovi građeni prije stupanja na snagu ove direktive ne ispunjavaju ove kriterije stabiliteta te je stoga potrebno naknadno opremanje. Kako je naknadno opremanje postojećih brodova izuzetno skupo, vrlo je korisno razviti histogram stanja mora, prvenstveno zbog sigurnosnih i ekonomskih razloga te utvrditi koliko iznosi značajna valna visina koja neće biti premašena s vjerojatnošću premašivanja većom od 10%. Veza između brzine vjetra i značajne visine vjetrom generiranih valova bitna je za razvoj standarda za ocjenu stanja mora te može poslužiti za procjenu stanja mora na temelju prognoze brzine vjetra [5]. Poznavanje valnih perioda važno je u analizi brodova i pomorskih objekata koji mogu biti pobuđeni gibanjem u blizini rezonancije [2].

Motivacija za izradu ovoga rada je u tome što su se dosadašnje statističke analize valnih parametara u Jadranu temeljile na podacima prikupljenim vizualnim zapažanjima i sporadičnim mjerenjima valografskih plutača [6]. Podaci prikupljeni vizualnim zapažanjima s trgovačkih brodova, prikazani u Atlasu klimatologije Jadrana [7], prikupljeni su prije nekoliko desetljeća. Atlas [7] ima više nedostataka, počevši od činjenice da ne sadrži podatke o valnim periodama, do toga da nema ni podataka o oštrim nevremenima, koja kapetani brodova redovito izbjegavaju. U Jadranu se nalazi vrlo mali broj valografskih plutača, koje su uglavnom u vlasništvu Republike Italije pa se stoga nalaze u zapadnom dijelu Jadrana. Podaci s tih valografskih plutača su nedostupni i nedovoljni jer održavanje takvih plutača traži značajna materijalna sredstva te su često van pogona.

Valni spektar je nužan preduvjet za spektralnu analizu plovnih objekata. Valni spektar korišten u Jadranskom moru je jednoparametarski Tabainov valni spektar. Tabainov spektar dobiven je modifikacijom JONSWAP spektra, a baziran je na ograničenom broju izmjerenih spektara valova [9]. Iako od velike važnosti, Tabainov spektar predstavlja vrlo

pojednostavljen opis uzburkanih valova Jadrana i nameće se potreba za njegovom revizijom.

Trenutno na tržištu postoje dva izuzetno kvalitetna atlasa valova relevantna za Jadransko more, MedAtlas [10] i WorldWaves atlas [11]. MedAtlas je opsežan skup podataka o vjetru i valovima, baziran na informacijama prikupljenih iz arhive ECMWF-a (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), UK, koji su zatim kalibrirani na bazi podataka dostupnih iz ERSI-2 i Topex satelita. Nastao je kao rezultat projekta sponzoriranoga od talijanske, francuske i grčke mornarice. WorldWaves atlas sadržava podatke kalibrirane koristeći različite satelitske misije, lokalna mjerenja valografskim plutačama i simulacije numeričkim valnim modelima. Mreža od otprilike četrdesetak kalibriranih točaka je dostupna za Jadransko more u WorldWaves-u [12].

U ovom radu, statistička analiza stanja mora izrađena je koristeći recentne podatke iz WorldWaves atlasa, koji su prikupljeni u zadnja dva desetljeća. Statistička analiza valnih parametara napravljena je za dvije geografske lokacije u Jadranu. Prva lokacija nalazi se u srednjem Jadranu, u blizini otoka Palagruže, sa sjevernom geografskom širinom  $42.5^\circ$  i  $16.5^\circ$  istočne geografske dužine. Druga lokacija nalazi se u sjevernom Jadranu, sa sjevernom geografskom širinom  $44.5^\circ$  i istočnom geografskom dužinom  $13.5^\circ$ . Ove dvije lokacije odabrane su zbog intenzivnoga pomorskog prometa te posljedično velikoga rizika sudara i nasukavanja u tim zonama [13].

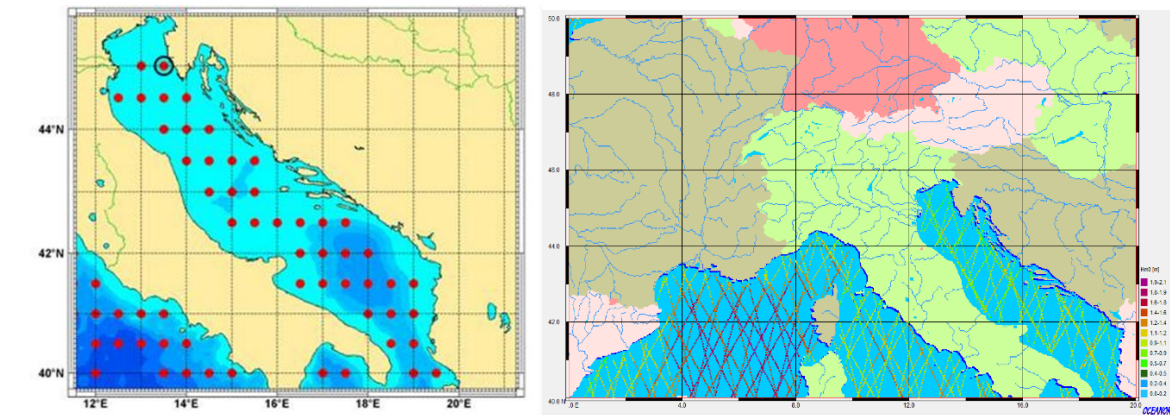
Prvi dio rada pruža opis podataka korištenih za statističku analizu, način njihova prikupljanja, kalibracije i validacije. Nadalje je objašnjen postupak statističke analize korištene u ovome radu te su zatim prikazani rezultati. Za dvije lokacije definirane su tablice stanja mora, koje prikazuju vjerojatnost pojavljivanja određene kombinacije značajne valne visine i valnih perioda. Zatim su podaci aproksimirani združenom teorijskom razdiobom vjerojatnosti koja omogućava određivanje najvjerojatnijih ekstremnih vrijednosti za dulja povratna razdoblja. Također je izvedena veza između brzine vjetra i visine vjetrovnih valova kao i relacija između vršnoga perioda spektra valova i visine valova. Koristeći opisanu metodologiju, provedena je komparativna analiza statističkih značajki i ekstremnih vrijednosti valova ove dvije lokacije. Napravljena je usporedba s Tabainovim spektrom valova te rezultatima dobivenim u drugim objavljenim istraživanjima. Rad završava s pripadnim zaključcima i raspravom rezultata. Dobiveni rezultati i izvedeni zaključci predstavljaju napredak u odnosu na postojeće podatke i saznanja o valovima Jadranskoga mora i imaju primjenjivost u analizi

pomorstvenosti pomorskih objekata i brodova te istraživanju potencijala za pretvorbu energije valova u električnu energiju.

## 2. WorldWaves atlas

WorldWaves atlas (WWA) je grupni naziv za niz opsežnih visoko rezolucijski interaktivnih vjetrovnih i valnih atlasa. Pri izradi WWA baze podataka korištena su tri tipa podataka o valovima, a to su: satelitska mjerenja, lokalna mjerenja valografskim plutačama i simulacije primjenom numeričkih modela valova uzburkanoga mora. WWA sadrži satelitske visinomjerske podatke pri punoj rezoluciji sa sljedećih satelitskih misija: *Geosat* (1986 – 1989), *TOPEX* (1992 – 2002), *Topex/Poseidon* (rujan 2002 – 2005), *Jason* (siječanj 2002 – 2008), *EnviSat* (listopad 2002 – listopad 2010), *Geosat Follow-On* (siječanj 2000 – 2008), *Jason-2* (srpanj 2008 – u tijeku), *Jason-1s* (veljača 2009 – ožujak 2012). Signal sa satelitskoga visinomjera sa orbite udaljene oko 1000 km, kada je propisno interpretiran, može osigurati sličnu točnost mjerenja značajne valne visine kao i valografska plutača. Značajna valna visina i brzina vjetra su izmjerene na određenim točkama svaki put kad satelit prolazi. Kako je ponavljanje ciklusa svakih 10 do 35 dana, prikupljeni podaci ne predstavljaju visoku vremensku rezoluciju mjerenja. Također, visinomjer mjeri samo značajnu valnu visinu i brzinu vjetra. Validacija satelitskih podataka izvršena je opsežnom usporedbom s podacima plutača na raznim lokacijama. Dugotrajna mjerenja valnim plutačama su i danas još uvijek rijetkost, a još su rjeđe mreže valografskih plutača. Neke najvažnije mreže plutača s direktnim mjerenjima visina valova su: *NOAA-NDBC* mreža plutača u SAD-u i Kanadi (nažalost mjere samo smjer valova), *Indian National Data Buoy Programme*, nacionalne mreže u Španjolskoj, Grčkoj, Francuskoj i Italiji (preblizu obali), Norveškoj i Sjevernom moru (mjerenja iz 1980-ih i 1990-ih za potrebe offshore industrije, nisu prikladna za valne modele). Podaci s plutača koriste se i za definiranje valnih perioda i valnih smjerova. Kako bi se omogućila visoka rezolucija o valnim podacima, satelitski podaci su kombinirani s najboljim dostupnim numeričkim modelima, kalibriranih prema dugoročnim satelitskim podacima. Numerički valni modeli nastoje replicirati porast, smanjivanje i propagaciju oceanskih valova, bazirajući se na ulazne podatke o vjetru u određenom području. U WWA je korišten jedan od najpoznatijih numeričkih modela valova WAM, kojeg koristi meteorološki centar ECMWF-a (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) [11].

Točke i satelitske putanje u Jadranskom moru za koje su dostupni podatci u WWA su prikazane na slici 1.



Slika 1. Mrežne točke i satelitske putanje u Jadranskom moru [14]

Podaci koji se nalaze u WWA prikazani su u tablici 1. Svi parametri navedeni u tablici su dostupni za interval od šest sati. Lokalni uvjeti vjetra su određeni koristeći spektralne udjele, kako bi se odredila vjetrovna valna komponenta, a ostala energija je pripisana komponenti mrtvoga mora.

Tablica 1. Dostupni parametri [14]

IME	OPIS
year	Godina opažanja
mm	Mjesec opažanja
dd	Dan opažanja
hh	Sat opažanja
SWH	Značajna valna visina
PP1D	Vršni period prvoga spektra
MWP	Srednji valni period
SHWW	Značajna valna visina vjetrovnoga vala
MPWW	Srednji valni period vjetrovnoga vala
SHPS	Značajna valna visina mrtvoga mora
MPPS	Srednji valni period mrtvoga mora
fro	Srednji valni kut nailaska $\mathcal{G}$
frw	Srednji valni kut nailaska vjetrovnoga vala $\mathcal{G}$
frs	Srednji valni kut nailaska mrtvoga mora $\mathcal{G}$
WD	Kut nailaska vjetra $Wdir$
WS	Brzina vjetra $Wsp$

Veliki uzorak podataka izmjerenih od rujna 1992. godine do kraja siječnja 2016. godine omogućuje razne analize, ovisno o specifičnosti istraživanja. Kao što je već navedeno podaci su dani za svakih šest sati, dakle u jednom danu dana su četiri mjerenja.

Ukupno, za svaku od lokacija sa slike 1 je dostupno 34460 mjerenja, a svako mjerenje sastoji se od parametara prikazanih u tablici 1.

### 3. Metodologija statističke analize valova

#### 3.1. Rubna razdioba značajnih valnih visina

Morski valovi se smatraju ergodičnim stohastičkim procesom. Ergodičan proces je onaj slučajan proces kojemu je statističko usrednjavanje jednako vremenskom usrednjavanju [15]. Valna elevacija može se smatrati gausijanskim procesom. Ova pretpostavka je najjednostavnija, ali i najefikasnija te najšire korištena pretpostavka [16]. Uzimajući u obzir ovu pretpostavku, pojedinačne valne visine  $h$  mogu se opisati teoretskim Rayleigh-ovim procesom za kratkoročno stanje mora [15]:

$$Q_S(h) = P(H > h) = \exp\left[-\left(\frac{h}{2\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right] = \exp\left(-\frac{h^2}{2H_s}\right) \quad (3.1)$$

gdje je  $\sigma$  varijanca procesa koja se računa prema (3.4).

U gornjoj jednažbi primjenjena je relacija [17]:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (3.2)$$

gdje  $m_0$  predstavlja spektralni moment nultoga reda a  $H_s$  značajnu valnu visinu, tj. prosječnu vrijednost trećine najviših valova. Spektralni moment  $n$ -toga reda računa se prema [17]:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega \quad (3.3)$$

Površina ispod funkcije spektra  $S(\omega)$  predstavlja nulti spektralni moment, tj. varijancu procesa [18]:

$$\sigma^2 = m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (3.4)$$

Spektar valova prikazuje raspodjelu energije vala za određene raspone frekvencija. Oblik valnoga spektra određenog trenutačnim promatranjima morskih valova značajno se razlikuje ovisno o geografskoj lokaciji, trajanju vjetra, fazi rasta i smirivanja oluja i postojanju tzv. 'mrtvoga mora'. Postoje razne empirijske formulacije valnoga spektra, a najpoznatije su: Pierson – Moskovitz spektar, Bretschneiderov spektar za otvoreno more,

JONSWAP spektar za obalna područja itd. [19]. Za Jadransko more razvijen je specifičan spektar valova. Pokojni profesor Tonko Tabain, nakon desetogodišnjeg sustavnoga mjerenja morskih valova na 14 različitih lokacija, od sjevernoga do južnoga Jadrana, formulirao je jednoparametarski valni spektar [20], tzv. Tabainov ili T-spektar. Izraz za Tabainov spektar valova glasi [9]:

$$S(\omega) = 0.862 \frac{0.0135g^2}{\omega^5} \exp\left[-\frac{5.186}{\omega^4 H_s^2}\right] \cdot 1.63^p \quad (3.5)$$

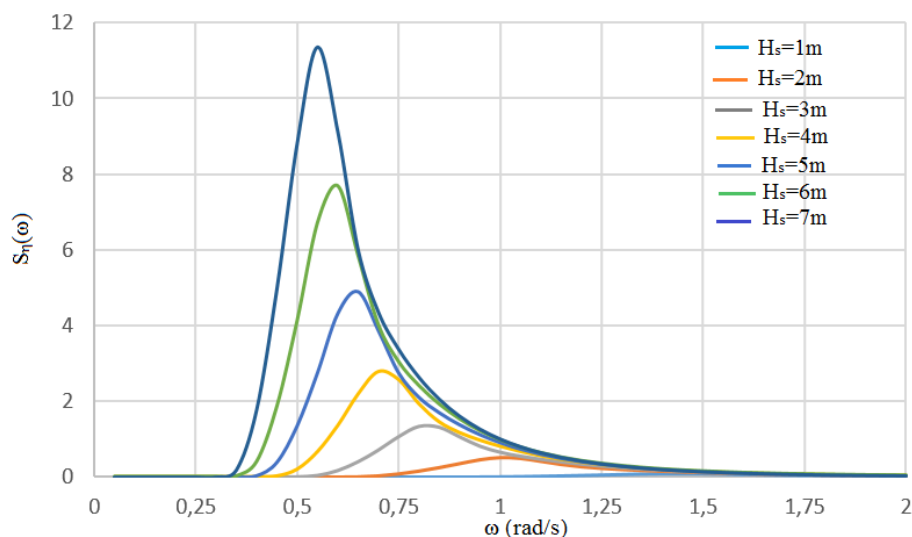
gdje je:

$$p = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_m)^2}{2\sigma^2 \omega_m^2}\right] \quad (3.6)$$

$$\omega_m = 0.32 + \frac{1.8}{H_s + 0.6} \quad (3.7)$$

a  $\sigma = 0.08$  za  $\omega \leq \omega_m$  te  $\sigma = 0.1$  za  $\omega > \omega_m$ .

Ovaj spektar valova je jednoparametarski jer je autor definirao vezu između modalne frekvencije i značajne valne visine relacijom (3.7). Na taj način je spektar valova u potpunosti definiran samo jednim parametrom, najčešće značajnom valnom visinom  $H_s$ . Sljedeća slika prikazuje familiju Tabainovih spektara za razne značajne valne visine.



Slika 2. Familija Tabainovih spektara valova

Ukoliko se stanja mora predviđaju za periode dužeg trajanja, onda se stanje mora ne može smatrati stacionarnim i rješenje treba uzeti u obzir slijed razdoblja stacionarnih stanja mora, pri čemu je svako individualno stanje mora definirano varijancom procesa izdizanja valovite površine. Stoga Rayleigheva distribucija postaje uvjetovana vrijednošću

varijance i bezuvjetna se razdioba vjerojatnosti valnih visina dobiva integracijom preko svih vrijednosti varijanci, ponderiranih po svojoj funkciji gustoće vjerojatnosti  $f(\sigma)$ . Dugoročna vjerojatnost premašivanja određene visine  $Q_L$  određuje se prema formuli:

$$Q_L(r) = \int_0^{\infty} Q_S(r/\sigma) f(\sigma) d\sigma \quad (3.8)$$

gdje  $Q_S$  predstavlja vjerojatnost premašivanja kratkoročnoga stanja mora, a određuje se prema (3.1) [15].

Model odziva pomorskoga objekta na kratkoročnom stanju mora ima sljedeće karakteristike: odziv je dobiven linearnom transformacijom ulaznoga valnog modela, zadržava iste statističke značajke (gausijanski proces) te postaje uskopojasan, što čini Rayleighov model za opisivanje vrijednosti odziva još više primjenjiv [15]. Model odziva pomorskoga objekta na dugoročnim stanjima mora uzima u obzir sva kratkoročna stanja mora, koja su u potpunosti definirana varijancama procesa, ponderirajući funkciju gustoće vjerojatnosti odziva na svako kratkoročno stanje mora. Funkcija gustoće vjerojatnosti određuje se ovisno o tome radi li se o fiksnom objektu ili o brodu prema sljedećim izrazima:

- za fiksne objekte morske tehnike:

$$f_R(r) dr = f(H_s, T_z, \vartheta) dH_s dT_z d\vartheta \quad (3.9)$$

- za brodove:

$$f_R(r) dr = f(H_s, T_z, \vartheta, v, c) dH_s dT_z d\vartheta dv dc \quad (3.10)$$

Dakle, ovisi o tablici stanja mora ( $H_s$  i  $T_z$ ) i smjeru nailaska valova za fiksne objekte morske tehnike, a za brodove još i o distribuciji brzina napredovanja broda i o stanjima krcanja broda [15].

Tablica stanja mora daje združenu vjerojatnost značajnih valnih visina i nultih valnih perioda. Iz tablice stanja mora određuje se vjerojatnost pojavljivanja određenoga stanja mora jednostavnim dijeljenjem učestalosti pojave određenoga stanja mora s ukupnim brojem svih stanja mora prikazanih u tablici stanja mora. Dakle, u tablici stanja mora prikazane su učestalosti za svako stanje mora koje se pojavilo u određenom periodu registriranja. Ovi podaci dobivaju se, kako je već prije napomenuto, opažanjima s brodova (upitno određivanje valnih perioda), mjerenjima koristeći plutače, mjerenjima sa satelita te

koristeći podatke o vjetru te modele koje povezuju brzinu vjetra sa značajnim valnim visinama.

Postoje razni izrazi koji općenito daju različite vrijednosti za procijenjenu vjerojatnosti premašivanja. Međutim, svi izrazi daju gotovo identične rezultate za velike uzorke, kao što je slučaj u ovome radu. Stoga je ovdje odabran Weibull-ov izraz, koji se i inače najčešće koristi:

$$Q(H_{s,i}) = \frac{m_i}{N+1} \quad (3.11)$$

U gornjem izrazu  $m_i$  (kumulativna relativna učestalost) predstavlja broj opažanja značajnih valnih visina većih ili jednakih  $H_{s,i}$ , a  $N$  ukupan broj opažanja. Ove vrijednosti moguće je odrediti iz tablice stanja mora. Kumulativna relativna učestalost ili broj opažaja određuje se sljedećom formulom:

$$m_i = \sum_{j=1}^i f_j \quad (3.12)$$

gdje  $f_j$  predstavlja učestalost pojavljivanja  $j$ -toga razreda značajne valne visine [3].

Nakon što je dobivena razdioba vjerojatnosti, teoretska Weibullova distribucija se prilagođava rezultatima. Moguće je koristiti dvoparametarsku ili troparametarsku Weibullovu distribuciju.

Izraz za vjerojatnost premašivanja dvoparametarske Weibullove razdiobe glasi:

$$Q(\hat{H}_s) = \exp\left(-\frac{\hat{H}_s}{\theta}\right)^\alpha \quad (3.13)$$

a za troparametarsku Weibullovu razdiobu glasi:

$$Q(\hat{H}_s) = \exp\left[-\frac{(\hat{H}_s - \varepsilon)}{\theta}\right]^\alpha, \hat{H}_s \geq \varepsilon \quad (3.14)$$

gdje je  $\varepsilon$  lokacijski parametar,  $\theta$  parametar skaliranja, a  $\alpha$  parametar oblika. Lokacijski parametar ima važnu fizikalnu interpretaciju kao mala značajna valna visina koja je uvijek prisutna i predstavlja stalnu morsku aktivnost [3].

U ovom radu dobiveni rezultati razdiobe vjerojatnosti aproksimirani su troparametarskom Weibull-ovom razdiobom prema postupku opisanom u [2]. Kako bi



troparametarsku Weibull-ovu razdiobu prikazali u linearnom mjerilu, potrebno je izraz (3.12) dva puta uzastopno logaritmirati te se tako dobije:

$$\ln(-\ln(Q(\hat{H}_s))) = \alpha \ln(\hat{H}_s - \varepsilon) - \alpha \ln \theta \quad (3.15)$$

Iz izraza (3.15) vidljivo je da se Weibull-ova troparametarska distribucija može prikazati kao pravac ako na apcisi unosimo  $\ln(\hat{H}_s - \varepsilon)$ , a na ordinatu lijevu stranu izraza (3.15). Parametri pravca (nagib- $a$  i presjecište ordinate- $b$ ) određuju se metodom najmanjih kvadrata. Tada se mogu odrediti i Weibull-ovi parametri  $\alpha$  i  $\theta$ :

$$\alpha = a \quad (3.16)$$

$$\theta = e^{-\frac{b}{a}} \quad (3.17)$$

Kako lokacijski parametar nije unaprijed poznat, potrebno ga je odrediti prije konstrukcije prethodno spomenutoga pravca. Lokacijski parametar moguće je odrediti ako prvotno pretpostavimo da iznosi  $\varepsilon = 0$ , što odgovara dvoparametarskoj Weibull-ovoj razdiobi. Zatim se podaci koji se žele aproksimirati prikažu u dijagramu koji na apcisi prikazuje vrijednosti  $\ln \hat{H}_s$ , a na ordinati vrijednosti  $\ln(-\ln(Q(\hat{H}_s)))$ . Kroz ucrtane točke potrebno je povući približnu krivulju. Nadalje je potrebno odrediti tri točke na krivulji kojima su ordinate međusobno jednako udaljene. Tada je potrebno očitati apcise tih točaka i izračunati pripadne značajne valne visine  $H_{s1}$ ,  $H_{s2}$ ,  $H_{s3}$ . Lokacijski parametar sada slijedi iz izraza:

$$\varepsilon = \frac{H_{s1}H_{s3} - H_{s2}^2}{H_{s1} + H_{s3} - 2H_{s2}} \quad (3.18)$$

### 3.2. Uvjetna razdioba nultih valnih perioda

Uvjetna razdioba nultih valnih perioda određena je prema postupku opisanom u [21]. Za uvjetnu razdiobu nultih valnih perioda za zadanu značajnu valnu visinu odabrana je logaritamsko-normalna razdioba:

$$F\left(\frac{T_z}{H_s}\right) = \Phi\left(\frac{\ln T_z - \mu_{\ln T_z}}{\sigma_{\ln T_z}}\right) \quad (3.19)$$

U gornjem izrazu  $\Phi$  je funkcija razdiobe vjerojatnosti jedinične (standardne) normalne razdiobe,  $\mu_{\ln T_z}$  srednja vrijednost logaritmiranih vrijednosti nultih valnih perioda, a  $\sigma_{\ln T_z}$  standardna devijacija logaritmiranih vrijednosti nultih valnih perioda. Primjenjujući

metodu momenata za prilagodbu razdiobe tabličnim podacima, tada se parametri logaritamsko-normalne razdiobe  $\mu_{\ln T_z}$  i  $\sigma_{\ln T_z}$  mogu odrediti prema:

$$\mu_{\ln T_z} = \ln \frac{\mu_{T_z}^2}{\sqrt{\sigma_{T_z}^2 + \mu_{T_z}^2}} \quad (3.20)$$

$$\sigma_{\ln T_z} = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_{T_z}^2}{\mu_{T_z}^2}\right)} \quad (3.21)$$

U gornjim izrazima  $\mu_{T_z}$  i  $\sigma_{T_z}$  predstavljaju srednju vrijednost, odnosno standardnu devijaciju empirijskih tabličnih podataka za nulte valne periode te se dobiju jednostavnom statističkom analizom.

Za zadanu značajnu valnu visinu funkcija gustoće vjerojatnosti nultih valnih perioda ima sljedeći oblik:

$$f\left(\frac{T_z}{H_s}\right) = \frac{1}{T_z \sigma_{\ln T_z} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln T_z - \mu_{\ln T_z}}{\sigma_{\ln T_z}}\right)^2\right] \quad (3.22)$$

Množeći izraz (3.22) s rubnom empirijskom učestalošću fiksne značajne valne visine  $H_{s,i}$  te širinom intervala (razreda) unutar kojega promatramo učestalost, dobivamo teorijske učestalosti prema logaritamsko-normalnoj razdiobi [21]. U ovom je radu odabrana širina intervala od 1 s.

### **3.3. Veza između brzine vjetra i značajne valne visine vjetrovnih valova te veza između dominantnoga perioda i značajne valne visine**

Veza između brzine vjetra izmjerene na visini od 10m i značajne valne visine vjetrom generiranih valova važna je radi definiranja standarda za ocjenu stanja mora te za prognozu visine valova ako je poznata brzina vjetra. Brzina vjetra se uobičajeno mjeri na visini od 10m [22]. Prema prethodno provedenim istraživanjima moguće je očekivati kvadratičnu vezu između visine valova i brzine vjetra [1]. Bitno je napomenuti kako regresijska krivulja treba proći kroz ishodište, kako bi se za brzinu vjetra 0 dobilo i značajnu valnu brzinu vjetrom generiranih valova 0 m.

Veza između dominantnoga perioda i značajne valne visine određena je prema postupku opisanom u [21]. Potrebno je u koordinatnom sustavu predočiti podatke, tako da

se na osi apcisa nanose vrijednosti  $\ln H_s$ , a na osi ordinata  $\mu_{Tz}$ . Ovako dobiveni podaci se mogu vrlo lako aproksimirati pravcima. Primjena tako dobivenoga regresijskog modela je za određivanje perioda ekstremnih stanja mora, koja nisu izmjerena i čiji je period stoga nepoznat.

### 3.4. Ekstremna stanja mora

Proračun ekstremnih stanja mora provodi se postupkom opisanim u [12]. Za proračun ekstremnih stanja mora potrebno je prilagoditi Weibull-ovu distribuciju empirijski dobivenoj razdiobi vjerojatnosti. Dugoročni valni ekstremi ovise o povratnom periodu. Povratni period je definiran kao prosječan broj godina u kojem stanje mora definirano značajnom valnom visinom  $H_s^{PP}$  biva jednom dostignuto ili premašeno. Iako je moguće razmatrati povratni period neke izmjerene veličine iz uzorka slučajne varijable, češće se povratni period koristi za definiranje neke prognozirane vrijednosti slučajne varijable. Valne prognoze za duga razdoblja nužno uključuju izračunavanje značajne valne visine  $H_s^{PP}$  nekoga povratnog perioda  $PP$  [3].

Nakon definiranja teorijske funkcije razdiobe vjerojatnosti slučajne varijable  $\hat{H}_s$ , potrebno je odrediti vjerojatnost premašivanja vrijednosti slučajne varijable značajne valne visine koja odgovara povratnom periodu prema:

$$Q(H_s^{PP}) = \frac{T_{REG}}{N} \cdot \frac{1}{PP} \quad (3.23)$$

gdje  $T_{REG}$  predstavlja razdoblje neprekidnoga opažanja (mjerjenja) vrijednosti slučajne varijable značajne valne visine  $\hat{H}_s$  iz kojeg je dobiven uzorak za proračun njene raspodjele vjerojatnosti, dok  $N$  predstavlja opseg uzorka, odnosno broj podataka u uzorku slučajne varijable značajne valne visine  $\hat{H}_s$  upotrijebljene za proračun njene raspodjele vjerojatnosti [12].

Omjer razdoblja neprekidnoga opažanja i opsega uzorka jest prosječni vremenski razmak među elementima uzorka. Ovaj omjer u ovome radu iznosio je 6 sati. Bitno je napomenuti kako je razmak među elementima uzorka potrebno iskazati u godinama, kao i povratni period. Vjerojatnost premašivanja vrijednosti slučajne varijable značajne valne visine  $H_s$  izračunava se za povratni period od 1, 5, 10, 50 i 100 godina.

Nakon što je određena vjerojatnost premašivanja vrijednosti slučajne varijable značajne valne visine  $H_s$ , pomoću Weibull-ove razdiobe se određuje ona vrijednost značajne valne visine koja će biti jednom premašena za vrijeme povratnoga perioda, a prema sljedećem izrazu:

$$H_s^{PP} = \theta(-\ln Q(H_s^{PP}))^{1/\alpha} + \varepsilon \quad (3.24)$$

Dobiveni rezultati prikazuju se tablično ili dijagramom kojemu se na osi apcisa nanose vrijednosti  $-\ln(Q(H_s^{PP}))$ , a na osi ordinata  $H_s$ .

### 3.5. Usporedba rezultata s Tabainovim spektrom valova

Kao što je već napomenuto, Tabainov spektar valova koristi se u analizi pomorstvenih značajki brodova i objekata morske tehnike u Jadranu. Tabainov spektar je jednoparametarski zbog jednoznačne veze između modalne frekvencije i značajne valne visine, izraz (3.7). Ova veza uspoređena je u ovom radu s podacima o značajnoj visini valova i modalne frekvencije iz WWA. Da bi se odredila kvaliteta relacije koja povezuje visinu valova i valni period, korišten je koeficijent determinacije [23]:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (3.25)$$

gdje je  $SS_{res}$  rezidualna suma kvadrata odstupanja koja se određuje kao

$$SS_{res} = \sum_i (y_i - f_i)^2 \quad (3.26)$$

a  $SS_{tot}$  ukupna suma kvadrata proporcionalna varijanci podataka:

$$SS_{tot} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.27)$$

Koeficijent determinacije označava koliko dobro podaci pristaju statističkom modelu. Ukoliko koeficijent iznosi 1, regresijska krivulja savršeno odgovara podacima, a ukoliko je  $R^2 = 0$ , regresijska krivulja uopće ne odgovara podacima [23].

#### 4. Rezultati statističke analize

Veliki skup podataka sadržan u WWA [14], s mjerenjima provedenim od rujna 1992. do kraja siječnja 2016. godine omogućuje razne analize, ovisno o svrsi istraživanja. U ovom radu, za dvije lokacije u srednjem i sjevernom Jadranu, statistički su obrađeni podaci iz WWA koristeći programe MATLAB i Microsoft Excell, za dvije lokacije u Jadranu.

U daljnjem tekstu lokacija koja ima sjevernu geografsku širinu  $42.5^\circ$  i  $16.5^\circ$  istočnu geografsku dužinu navodit će se kao lokacija A, a lokacija sa sjevernom geografskom širinom  $44.5^\circ$  i istočnom geografskom dužinom  $13.5^\circ$  kao lokacija B. Lokacija A je smještena u srednjem Jadranu, u blizini najudaljenijeg hrvatskoga otoka Palagruže, a druga u sjevernom Jadranu. Obje su lokacije zanimljive jer se nalaze na frekventnim prometnim rutama trgovačkih brodova. Sljedeća slika prikazuje položaj obje lokacije u Jadranskom moru.



Slika 3. Položaj lokacija A i B u Jadranskom moru

##### 4.1. Tablica stanja mora

Svi podaci za lokaciju A i lokaciju B grupirani su u razrede značajnih valnih visina te njima pripadne razrede valnih perioda. Širina razreda značajne valne visine odabrana je

0.5 m, a širina valnih perioda 1 s, što je u skladu sa sličnim istraživanjima [12] [6]. Kako dostupni parametri prikazani u Tablici 1 ne uključuju nulte valne periode, već vršne periode spektra valova, oni su korišteni u daljnjoj analizi. Vršni period je predložen kao standardni periodni parametar koji se može koristiti u frekvencijskoj spektralnoj jednažbi, te je naznačen kao osnovni period, prema kojem bi se svi drugi periodi trebali referirati. Nulti valni period,  $T_z$ , ostaje kao drugi izbor i to više zbog direktne procjene iz valnoga zapisa nego zbog stvarne važnosti kao ključne karakteristike u određivanju spektralnih karakteristika [24]. “Koordinate” svakoga razreda predstavljaju gornju granicu odabranoga razreda. Npr.  $H_s$  sa 1.5 m predstavlja razred značajnih valnih visina između 1 i 1.5 m. Sljedeće tablice prikazuju tablice stanja mora za lokaciju A i lokaciju B.

Tablica 2. Tablica stanja mora za lokaciju A

$T_p/H_s$	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	Suma
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4934	1666	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6614
4	3552	6815	861	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11248
5	589	3800	2616	666	36	0	0	0	0	0	0	0	0	7707
6	260	1114	1533	1256	500	113	5	0	0	0	0	0	0	4781
7	166	326	459	445	393	255	70	14	3	0	0	0	0	2131
8	93	103	138	159	128	111	91	51	21	7	1	0	0	903
9	28	68	36	44	54	38	38	22	12	5	1	1	1	348
10	11	29	14	10	13	11	10	7	2	1	4	1	0	113
11	4	8	4	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	19
12	8	3	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
13	14	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
14	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
<b>Suma</b>	9663	13933	5680	2603	1124	529	214	94	38	13	6	2	1	33900

Tablica 3. Tablica stanja mora za lokaciju B

$T_p/H_s$	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	Suma
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	8222	2044	49	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10316
4	3666	5150	904	58	2	0	0	0	0	0	0	0	0	9780
5	1086	2615	1580	442	90	10	0	1	0	0	0	0	0	5824
6	603	1105	1030	708	371	122	25	3	1	0	0	0	0	3968
7	604	651	412	264	250	199	119	55	11	2	1	0	1	2569
8	72	158	189	111	53	46	39	34	24	10	5	1	3	745
9	32	71	37	29	16	17	3	1	3	3	0	1	1	214
10	12	15	8	4	2	3	1	0	1	0	0	0	1	47
11	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
12	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
13	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
14	7	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
<b>Suma</b>	14313	11813	4210	1617	784	397	187	94	40	15	6	2	6	33484

#### 4.2. Weibull-ova troparametarska razdioba značajnih valnih visina

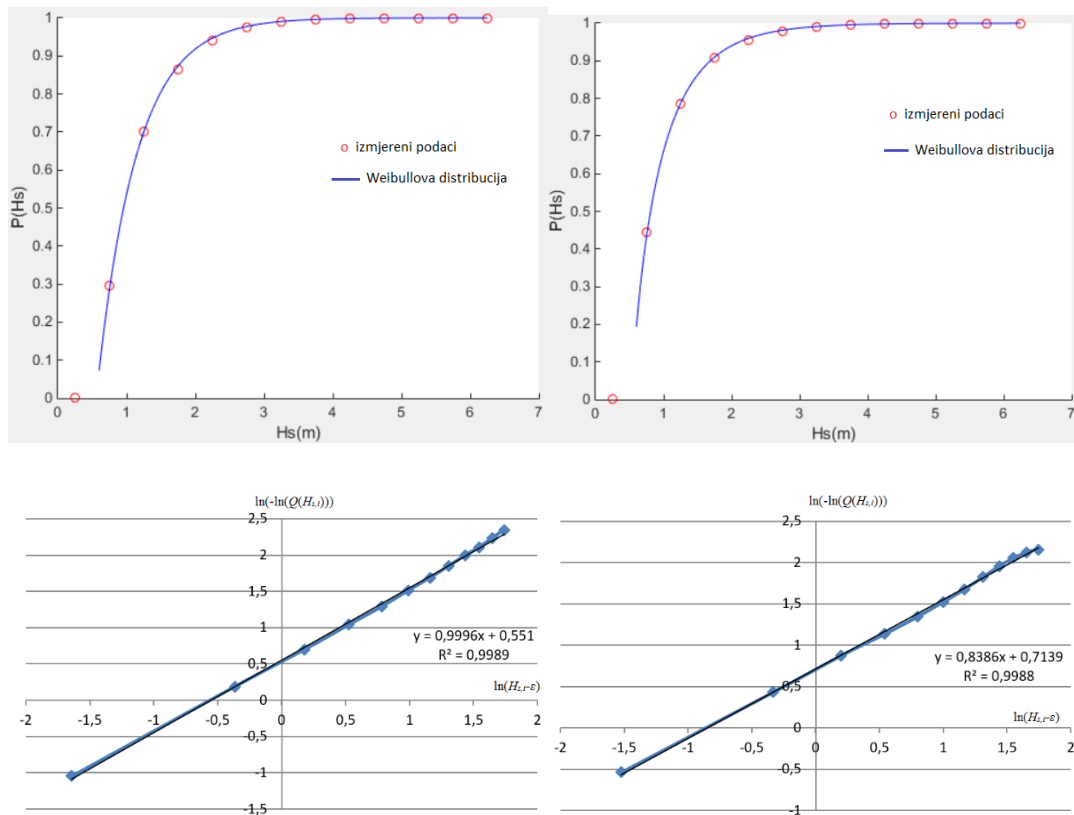
Prema prethodno navedenom postupku prilagođena je troparametarska Weibull-ova razdioba empirijskoj razdiobi vjerojatnosti za lokaciju A i lokaciju B. Dobiveni Weibull-ovi parametri prikazani su sljedećom tablicom.

Tablica 4. Weibull-ovi parametri

Weibullov parametar	Lokacija A	Lokacija B
$\alpha$	0.9996	0.8386
$\varepsilon$	0.5565	0.5320
$\theta$	0.5762	0.4269

Slika 4. prikazuje usporedbe izmjerenih i teoretskih funkcija distribucije za lokacije A i B. Kako se Weibull-ova distribucija može primijeniti samo za značajne valne visine veće od lokacijskoga parametra, moguće je uočiti na slikama kako Weibull-ovu distribuciju nije moguće prilagoditi za prve razrede, budući da oni imaju sredinu razreda

0.25 m, što je manje od dobivenih vrijednosti lokacijskih parametara. Praktična važnost toga odstupanja je zanemariva.



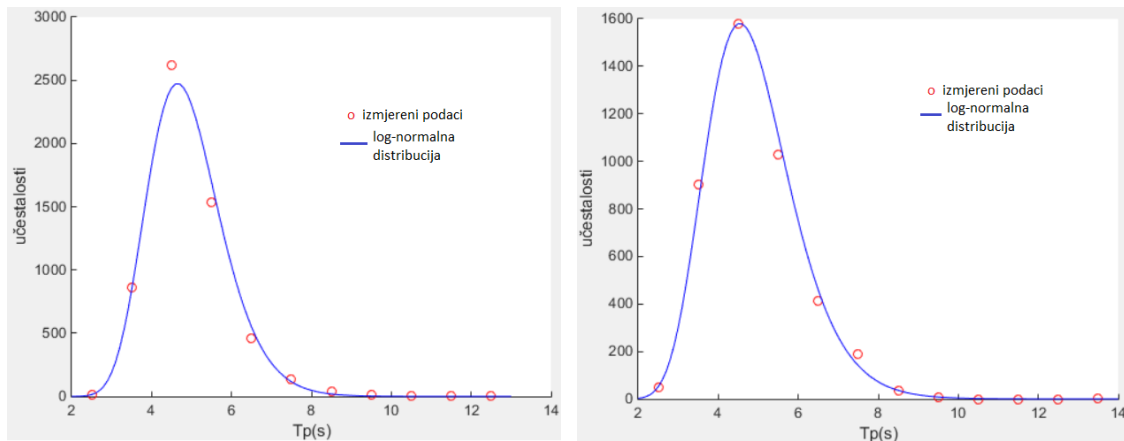
Slika 4. Usporedba izmjerenih frekvencija i teoretske funkcije distribucije za lokaciju A (lijevo) i lokaciju B (desno) te prikaz prilagodbe teoretske funkcije distribucije

Iz prethodnih slika moguće je uočiti da teorijska troparametarska parametarska Weibull-ova razdioba vjerodostojno opisuje izmjerene podatke te ju je moguće koristiti u daljnjoj statističkoj analizi za proračun ekstremnih stanja mora.

#### 4.3. Logaritamsko – normalna razdioba vršnih perioda

Uvjetna razdioba valnih perioda određena je za svaki razred valnih visina za obje lokacije prema postupku opisanom u 3.2. Na slici 5. su prikazane usporedbe teoretskih i izmjerenih učestalosti vršnih perioda za razred značajnih valnih visina sa srednjom vrijednošću 1.25 m. Može se zaključiti da su log-normalne krivulje približno zvonolike i simetrične te da je najvjerojatnija vrijednost (modalna vrijednost) približno jednaka srednjoj vrijednosti.



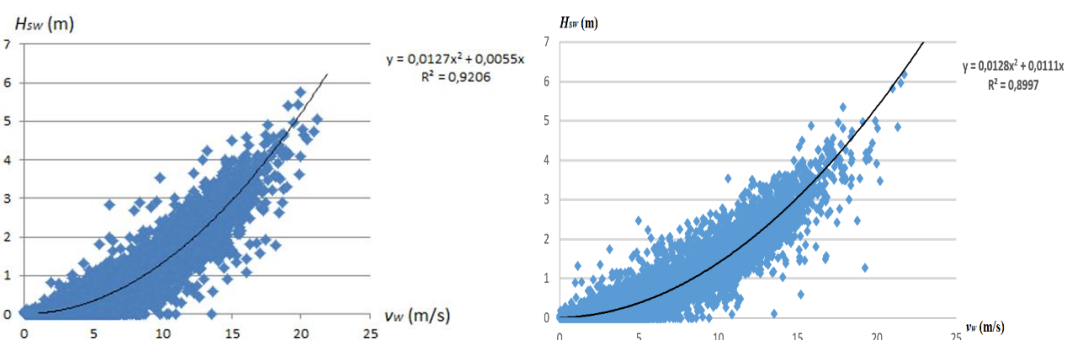


Slika 5. Usporedba izmjerenih i teoretskih učestalosti vršnih perioda za lokaciju A (lijevo) i lokaciju B (desno)

Iz prethodnih slika moguće je uočiti iznimno dobro poklapanje teoretske log-normalne razdiobe i izmjerenih vrijednosti.

#### 4.4. Veza između brzine vjetra i značajne valne visine vjetrom generiranih valova

Prema postupku opisanom u poglavlju 3.3. određena je veza između brzine vjetra i značajne valne visine vjetrom generiranih valova. Trend u obliku polinoma drugoga stupnja je utvrđen kao najprikladniji, posebno za veće brzine vjetra. Na slici 6. su prikazane dobivene jednadžbe i koeficijent determinacije za obje lokacije.



Slika 6. Veza između značajne valne visine vjetrom generiranih valova i brzine vjetra za lokaciju A (lijevo) i lokaciju B (desno)

Može se uočiti da je koeficijent determinacije za obje točke relativno velik što pokazuje da je izvedena relacija općenito prilično pouzdana, ali treba biti korištena s oprezom, jer u nekim situacijama bitno precjenjuje, odnosno podcjenjuje stvarne iznose značajnih valnih visina.

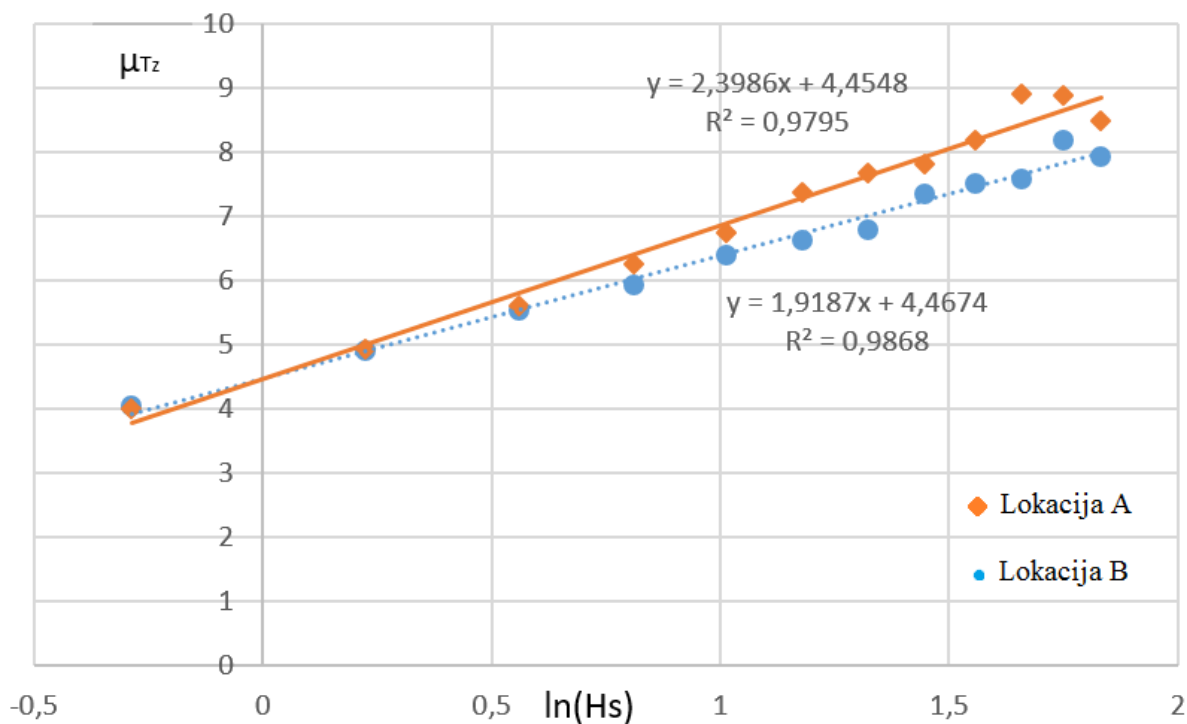
#### 4.5. Veza između dominantnoga perioda i značajne valne visine

Veza između dominantnoga perioda i značajne valne visine određena je za obje lokacije. Ova veza ima praktičnu primjenjivost i to u određivanju valnih perioda ekstremnih stanja mora, koja su redovito izvan okvira tabličnih podataka. Ekstrapolacija podataka racionalan je način određivanja pripadnih valnih perioda (u ovom slučaju vršnih perioda spektra) [21]. Sljedećim jednadžbama prikazane su dobivene veze.

$$\mu_{T_z} = 2.399 \ln(H_s) + 4.455 \quad (4.1) \quad \text{za lokaciju A}$$

$$\mu_{T_z} = 1.919 \ln(H_s) + 4.467 \quad (4.2) \quad \text{za lokaciju B}$$

Sljedeća slika prikazuje dobivene veze između dominantnoga perioda i značajne valne visine za obje lokacije.



Slika 7. Međusobna zavisnost očekivanoga valnog perioda i značajne valne visine za lokacije A i B

#### 4.6. Proračun ekstremnih stanja mora

Proračunom ekstremnih stanja mora dobiva se značajna valna visina za koju se očekuje da će biti jednom dosegnuta ili premašena unutar određenoga povratnog perioda. Značajne valne visine koje odgovaraju različitim povratnim razdobljima su prikazane u Tablici 5.

Tablica 5. Najvjerojatnija ekstremna stanja mora

Povratni period (godine)	$H_s^E$ (m) točka A	$H_s^E$ (m) točka B
1	4.76	5.09
5	5.69	6.32
10	6.09	6.86
20	6.49	7.41
50	7.02	8.14
100	7.42	8.71

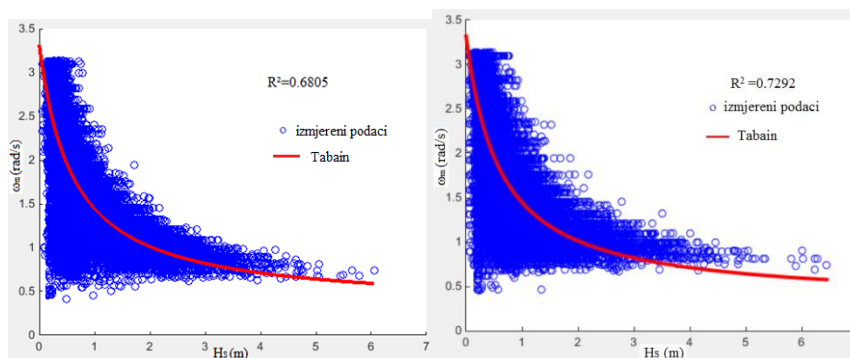
Može se uočiti kako su ekstremne valne visine dobivene za lokaciju B više nego za točku A. Ovo se može objasniti činjenicom kako su najviši valovi uglavnom uzrokovani jugoistočnim (JI) olujnim vjetrovima [1], a lokacija B u sjevernom Jadranu ima za ove vjetrove znatno dulje privjetrište.

#### 4.7. Ovisnost vršne spektralne frekvencije i značajne valne visine

Ovisnost vršne frekvencije spektra i značajne valne visine prema Tabainovom spektru valova (izraz 3.7) uspoređena je s podacima dobivenim satelitskim mjerenjima iz WWA. Kako raspoloživi podaci daju parametar vršnoga perioda spektra, vršna frekvencija izračunata je izrazom (4.3):

$$\omega_m = \frac{2\pi}{T_p} \quad (4.3)$$

Slika 8. prikazuje usporedbu veze značajne valne visine i vršne frekvencije za lokacije A i B.



Slika 8. Eksperimentalna i teorijska veza između vršne frekvencije spektra i značajne valne visine za lokaciju A (lijevo) i lokaciju B (desno)

## 5. Komparativna analiza rezultata

### 5.1. Komparativna analiza tablica stanja mora

Osnova statističke analize valova je odabir tablice stanja. Tablice stanja prikazane u ovom radu dobivene su iz podataka prikupljenih satelitskim mjerenjima sadržanim u WWA za dvije lokacije u Jadranskom moru (Tablica 2. za srednji Jadran i Tablica 3. za sjeverni Jadran)

Tablica stanja mora za lokaciju A u srednjem Jadranu pokazuje očekivanu koncentraciju oko malih vrijednosti te je skoro 70% izmjerenih značajnih valnih visina manje od jednoga metra. Prosječna vrijednost značajne valne visine iznosi 0.87m, sa standardnom devijacijom od 0.61m, a prosječna vrijednost vršnoga perioda spektra iznosi 4.21s. Najviša zabilježena značajna valna visina iznosi  $H_s=6.05\text{m}$ , a zabilježena je 8. prosinca 1992 godine.

Tablica stanja mora za lokaciju B također pokazuje koncentraciju oko malih vrijednosti. Za ovu lokaciju je 78% izmjerenih značajnih valnih visina manje od 1m. Prosječna vrijednost značajne valne visine iznosi 0.72m, sa standardnom devijacijom od 0.59m, a prosječna vrijednost vršnoga perioda spektra iznosi 3.86s. Najviša zabilježena značajna valna visina iznosi  $H_s=6.45\text{m}$ , a zabilježena je 2. siječnja 1993 godine.

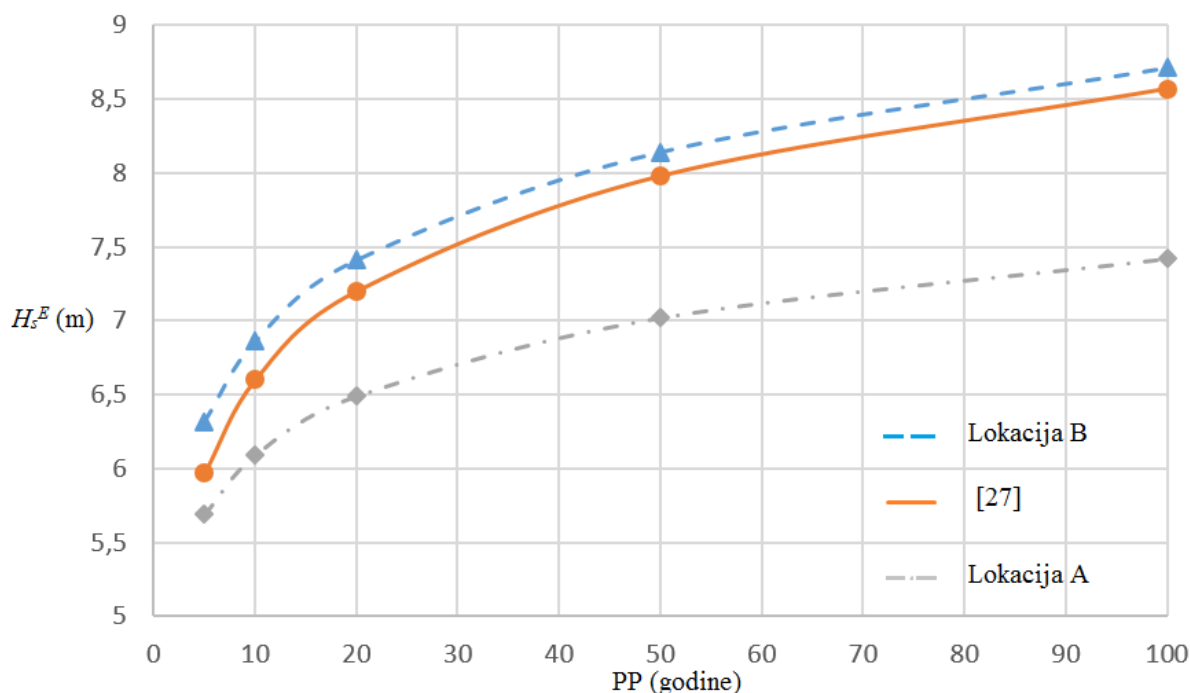
Dobivene tablice mora, konzistentne su s rezultatima dobivenim u [25], gdje je 80% značajnih valnih visina manje od 1.1m. Zanimljiva je usporedba tablice stanja mora za lokaciju B i tablice stanja mora prikazane u [6] na osnovi mjerenja s valografske plutače u sjevernom Jadranu. Naime u [6], 82% značajnih valnih visina manje je od 1m, što je

vrlo blizu podacima dobivenim za točku B. Mala razlika može se objasniti činjenicom kako je lokacija B na znatno otvorenijem moru, nego lokacija plutače korištene za mjerenje u [6]. Dobivene srednje vrijednosti značajnih valnih visina, kao i standardne devijacije, također se relativno dobro slažu s rezultatima iz [25] gdje je dobivena prosječna vrijednost značajne valne visine 0.85m, a standardna devijacija 0.6m. Bitno je napomenuti kako se rezultati iz [25] odnose na cijeli Jadran, a rezultati znatno ovise o lokaciji pa su dobivena odstupanja zadovoljavajuća.

Izvedene teoretske razdiobe nije moguće usporediti s prethodnim istraživanjima. Naime, prethodno dobivene Weibull-ove troparametarske razdiobe određene su za cijelo Jadransko more [12] ili za dio Mediteranskoga mora [26], a u ovome radu teoretska troparametarska razdioba prilagođena je za dvije točno određene lokacije u Jadranskom moru. Uvjetna razdioba vršnih perioda spektara za Jadransko more do sada nije objavljena u literaturi.

## **5.2. Komparativna analiza ekstremnih stanja mora**

Značajne valne visine ekstremnih stanja mora za lokaciju B u sjevernom Jadranu moguće je usporediti s rezultatima prikazanim u [27]. Podaci korišteni za proračun značajnih valnih visina ekstremnih stanja mora u [27] dobiveni su mjerenjima u sjevernom Jadranu, gdje je korištena metoda aproksimacija distribucije mjesečnih ekstrema Gumbelovom razdiobom vjerojatnosti. Mjesečni ekstremi su bili dostupni za period od 10 godina (1978-1986 i 1992). Najviša značajna valna visina izmjerena u 10 godina bila je 6.58m, a izmjerena je u prosincu 1979. godine. Teoretska prognoza najvjerojatnije značajne valne visine koja će biti jednom dosegnuta ili premašena za povratni period od 20 godina iznosila je 7.20m, a za povratni period od 100 godina iznosila je 8.57m. Ovi rezultati su vrlo bliski rezultatima dobivenima u sadašnjem istraživanju za lokaciju B. Usporedba značajnih valnih visina ekstremnih stanja mora za različita povratna razdoblja za lokacije A i B je prikazana na slici 9. Rezultati iz [27], usporedivi s točkom B u sjevernom Jadranu su također prikazani na slici 9.



Slika 9. Usporedba značajnih valnih visina ekstremnih stanja mora dobivenih za lokacije A i B i ekstremnih stanja mora iz [27]

Kao što je moguće vidjeti na slici 9. značajne valne visine ekstremnih stanja mora veće su za lokaciju B nego za lokaciju A, iako je srednja vrijednost značajne valne visine lokacije B manja od srednje vrijednosti značajne valne visine lokacije A. Značajne valne visine ekstremnih stanja mora ovise o Weibull-ovim parametrima, računaju se prema formuli (3.24). Kako je za lokaciju B izmjereno u posljednjih 23 godine čak 6 stanja mora u razredu sa srednjom vrijednošću 6.25m, a za lokaciju B samo jednom, dva puta logaritmirana vjerojatnost premašivanja značajne valne visine 6.25 m za lokaciju A iznosi:  $\ln(-\ln(Q(H_{s,i}))) = 2.346$ , a za lokaciju B iznosi:  $\ln(-\ln(Q(H_{s,i}))) = 2.158$ . Lokacija A ima ove iznose veće i za ostale razrede, kako se vjerojatnost premašivanja računa kumulativnim zbrajanjem učestalosti. Kako je lokacijski parametar vrlo sličan, pravac u dijagramu  $\ln(H_s - \varepsilon)$ ,  $\ln(-\ln(Q(H_{s,i})))$  za lokaciju A ima veći nagib te stoga i veći Weibull-ov parametar  $\alpha$  (3.16). Ovaj parametar najviše utječe na značajnu valnu visinu ekstremnoga stanja mora što se može uočiti u formuli (3.24),  $\alpha$  djeluje eksponencijalno. Stoga su dobivene značajne valne visine ekstremnoga stanja mora veće za lokaciju B. Ovo je i bilo logično za očekivati, kako su se unutar mjerenja za lokaciju B čak 6 puta zabilježene značajne valne visine razreda sa srednjom vrijednošću 6.25m, a za lokaciju A

samo jednom. Također najviša značajna valna visina izmjerena za lokaciju B je viša za 0.4m od najviše značajne valne visine za lokaciju A.

### **5.3. Analiza ovisnosti spektralne vršne frekvencije i značajne valne visine**

Tabainova relacija (3.7), koja povezuje značajnu valnu visinu i vršni spektralni period, uspoređena je s podacima iz WWA te je određen koeficijent determinacije za obje lokacije. Na slici 8 moguće je uočiti da su za veće značajne valne visine, izmjerene vršne frekvencije veće nego one definirane formulom (3.7). Ovu pojavu moguće je uočiti i u izvornim podacima korištenima za definiranje Tabainovoga spektra [9]. Veće vršne frekvencije od očekivanih prema (3.7), odgovaraju kraćim valovima. Ova jako izražena valna strmina može se objasniti specifičnim obilježjima klime valova Jadranskoga mora. Naime, pojava snažnih vjetrova na ograničenom privjetrištu uzrokuje relativno visoke i kratke valove “mladoga” stanja mora u usporedbi s potpuno razvijenim stanjima mora koja se mogu uočiti u oceanskim morima [1].

Kako su dobiveni koeficijenti determinacije relativno mali, za lokaciju A ( $R^2=0.68$ ) te za lokaciju B ( $R^2=0.73$ ), može se zaključiti da jednoparametarski Tabainov valni spektar nije dovoljan za opis svih relevantnih stanja mora u Jadranu. Potrebno je provođenje daljnjih istraživanja na ovom području s ciljem eventualnoga poboljšanja Tabainovog spektra valova.

## **6. Zaključak**

U radu je prikazan probabilistički opis stanja mora za dvije lokacije u Jadranskom moru (sjeverni i srednji Jadran). Probabilistički model temelji se na podacima izmjerenim pomoću satelitskih mjerenja i numeričkih modela valova uzburkanoga mora. Ovi su podaci novijeg datuma, prikupljeni od rujna 1992 godine do kraja siječnja 2016 godine te objedinjeni u pomorskom atlasu WWA. Obradeni podaci su prikladniji za statističku analizu od do sada korištenih podataka prikupljenih vizualnim zapažanjima s brodova, jer je interval uzorkovanja konstantan i nema unesene pogreške pristranosti. Također su prikladniji i od podataka prikupljenih mjerenjima s valografskih plutača jer su plutače uglavnom postavljene u blizini obale, a k tome postoji jako malo funkcionalnih plutača u Jadranu.

Rezultati ove analize su pokazali da su stanja mora sa značajnim valnim visinama manjim od 1m najčešća u Jadranu te čine gotovo 70% stanja mora u srednjem i 78% stanja mora u sjevernom Jadranskom moru. Prosječna značajna valna visina u srednjem Jadranu iznosi 0.87m, a u sjevernom 0.72m. Najviša izmjerena značajna valna visina u posljednje 23 godine je za srednji Jadran zabilježena 6.05m u prosincu 1992. godine, a za sjeverni Jadran 6.45m u siječnju 1993. godine. Treba napomenuti da su odabrane dvije reprezentativne lokacije u srednjem i sjevernom Jadranu i da postoji mogućnost da su na obližnjim lokacijama zabilježena i oštrija stanja mora.

Dokazana je veza u obliku polinoma 2. stupnja između brzine vjetra mjerene na visini od 10 metara i značajne valne visine vjetrom generiranih valova. Regresijska analiza pokazala je da je takav odnos prilično pouzdan i ima visok koeficijent determinacije te se može koristiti za predviđanje stanja mora za poznate brzine vjetra i u sjevernom i u srednjem Jadranu.

Uspostavljena je i veza očekivanoga vršnog perioda spektra i značajne valne visine, koja se koristi za određivanje valnih perioda ekstremnih stanja mora koja su često izvan tabličnih podataka i za koje su periodi nepoznati.

Ekstremne značajne valne visine u sjevernom Jadranu, koje su dobivene u prikazanoj analizi, vrlo su slične rezultatima prethodne analize [27] koja se temeljila na podacima prikupljenim mjerenjem na valografskim plutačama u sjevernom Jadranu u periodu od 10 godina.

Usporedba s jednoparametarskim Tabainovim spektrom valova pokazala je da jednoparametarski spektar nije dovoljno pouzdan za opis svih stanja mora u Jadranskom moru., Veza između vršne frekvencije spektra i značajne valne visine nije moguće jednoznačno opisati izrazom (3.7), a što je osnovna pretpostavka Tabainovoga jednoparametarskog spektra. Zbog toga je prikladnije koristiti dvoparametarsku formulaciju spektra valova Jadrana, za što su potrebna daljnja istraživanja na ovom području. Također, zaključeno je da je vršni spektralni period ekstremnih stanja mora precijenjen korištenjem Tabainovoga spektra valova.



## **7. Zahvale**

Rad je podržan od Hrvatske zaklade za znanost projektom 8658.

Podatci iz WWA koji su korišteni u ovoj studiji su dostavljeni od Fugro OCEANOR AS.

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Jošku Parunovu na korisnim savjetima, preporučenoj literaturi, strpljenju i mentorstvu tijekom izrade ovoga rada.

## 8. Literatura

- [1] Katalinić M., Čorak M. i Parunov J. (2014): Analysis of wave heights and wind speeds in the Adriatic Sea, *Maritime Technology and Engineering*, 1389-1394.
- [2] Wist H. T. (2003): Statistical properties of successive ocean wave parameters, Doktorski rad, Faculty of Engineering Science and Technology, Trondheim
- [3] Parunov J. i Senjanović I. (2000): Metode za dugoročnu prognozu ekstremnih stanja mora, *Brodogradnja* 48 2, 131-138
- [4] Direktiva 2003/25/ez europskog parlamenta i vijeća (2003)
- [5] Tabain T. (1974): Prijedlog standarda stanja mora za Jadran, *Brodogradnja* 25 3, 251-258
- [6] Cavaleri L., Curiotto S., Mazzoldi A. i Pavanati M. (1997): Long term directional wave recording in the Northern Adriatic Sea, *Il nuovo cimento* 20, 103-110
- [7] Hydrographic Institute of Republic of Croatia (1979): Atlas of the Climatology of the Adriatic Sea
- [8] Katalinić M. i Parunov J. (2014): Pregled klimatskih prilika u Jadranskom moru, XXI Simpozij Sorta
- [9] Tabain T. (1997): Standard Wind Wave Spectrum for the Adriatic Sea Revisited (1977-1997), *Brodogradnja* 45 4, 303-313
- [10] Cavaleri L. (2005): The wind and wave atlas of the Mediterranean Sea - the calibration phase, *Advances in Geosciences* 2, 255-257
- [11] Barstow S. et al. (2003): WorldWaves: Fusion of data from many sources in a user-friendly software package for timely calculation of wave statistics in global coastal waters, The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers
- [12] Parunov J., Čorak M., i Pensa M. (2011): Wave height statistics for seakeeping assessment of ships in the Adriatic Sea, *Ocean Engineering* 38, 1323-1330.
- [13] Zec D., Maglić L. i Šimić Hlača M. (2009): Maritime Transport and Possible Accidents in the Adriatic Sea, 17th Annual Conference of the European Environment and Sustainable Development Advisory Councils EEAC

- [14] Barstow S.(2016): Long-term WorldWaves data in the Adriatic Sea, Fugro OCEANOR, 2016. (interna komunikacija)
- [15] Guedes Soares C. (2008): Modelling of the environment Sea Surface Representation, ASDEPP Course University of Rijeka
- [16] Rychlik I., Johannesson P. i Leadbetter M.R. (1997): Modelling and Statistical Analysis of Ocean-wave Data Using Transformed Gaussian Processes, Maritime structures 10, 13-47
- [17] Prpić-Oršić J. i Čorić V. (2006): Pomorstvenost plovnih objekata, ZIGO-obrt za trgovinu i nakladništvo, Rijeka
- [18] Rudan S. (2002): Spektralna analiza zamora brodskih konstrukcija, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [19] Spektralni postupak proračuna zamora,  
[https://www.fsb.unizg.hr/kziha/shipconstruction/main/zamor/4\\_spektralni%20postupak%20proracuna%20zamora.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/kziha/shipconstruction/main/zamor/4_spektralni%20postupak%20proracuna%20zamora.pdf), 20.4.2016
- [20] Čorić V. (2010): Tabainov spektar, Brodogradnja 61 2, 187-191
- [21] Parunov J. i Senjanović I. (1999): Združena razdioba vjerojatnosti značajnih valnih visina i nultih valnih perioda, Radovi FSB XXIII, 25-33
- [22] Det Norske Veritas (2010): Recommended Practice Dnv-Rp-C205, Environmental Conditions and Environmental Loads, Listopad 2010
- [23] Coefficient of determination,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient\\_of\\_determination](https://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_determination), 20.4.2016
- [24] Michel W.H. (1999): Sea Spectra Revisited, Marine Technology 36 4, 211-227
- [25] Queffeulou P. i Bentamy A. (2007): Analysis of Wave Height Variability Using Altimeter Measurements: Application to the Mediterranean Sea, Journal of atmospheric and oceanic technology 24, 2078-2092.
- [26] NATO ANEP 11 (1983): Standardized wave and wind environments for NATO operational areas, Travanj 1983
- [27] Leder N., Smirčić A. i Vilibić I. (1998): Extreme values of surface wave heights in the Northern Adriatic, Geofizika 15, 1-13.

## 9. Sažetak

Andrea Farkas: Usporedna analiza statističkih značajki valova srednjega i sjevernoga Jadrana

Ključne riječi: Jadransko more, statistika valova, satelitska mjerenja

U radu je prikazana metodologija statističke analize valova Jadranskoga mora, koristeći recentne rezultate satelitskih mjerenja stanja mora od 1992. – 2016. Za dvije lokacije, u srednjem i sjevernom Jadranu, definirane su tablice stanja mora, koje prikazuju vjerojatnost pojavljivanja određene kombinacije značajne valne visine i valnih perioda. Podaci su aproksimirani združenom teorijskom razdiobom vjerojatnosti koja omogućuje određivanje najvjerojatnijih ekstremnih vrijednosti za dulja povratna razdoblja. Uspostavljena je veza brzine vjetrova i visine valova, te veza između perioda i visine valova. Rezultati su uspoređeni s Tabainovim spektrom valova koji se uobičajeno koristi u analizama pomorstvenosti brodova i pučinskih objekata u Jadranu. Koristeći opisanu metodologiju, provedena je komparativna analiza statističkih značajki i ekstremnih vrijednosti valova u srednjem i sjevernom Jadranu. Dobiveni rezultati i izvedeni zaključci predstavljaju napredak u odnosu na postojeće podatke i saznanja o valovima Jadrana i imaju primjenu u analizi pomorstvenosti pomorskih objekata te istraživanjima potencijala za korištenje energije valova.

## **10. Summary**

Andrea Farkas: Comparative analysis of the statistical characteristics of the middle and northern Adriatic waves

Key words: Adriatic sea, wave statistic, satellite measurements

This paper presents a methodology of statistical analysis of the waves of the Adriatic Sea, using recent results of satellite measurements of sea states from 1992. – 2016. For two locations in the central and northern Adriatic, wave scatter diagrams are defined, showing the probability of certain combinations of significant wave height and wave period. The data are approximated by a theoretical joint probability distribution that allows the determination of the most probable extreme values for longer return periods. The relationship between wind speed and wave height, as well as the relationship between the wave periods and wave heights are also established. The results are compared with the Tabain wave spectrum, commonly used in analyzing the seakeeping of ships and offshore structures in the Adriatic Sea. Using the described methodology, a comparative study of statistical features and extreme values of the waves in the central and northern Adriatic is carried out. The results and conclusions represent an improvement of the existing data and knowledge about the waves of the Adriatic Sea and they can be widely used in the analysis of seakeeping of marine structures and in the research of the potentials concerning the wave energy exploitation.