

# Dugoročna prognoza morskih valova u Jadranskom moru

---

**Dlaka, Vladimir**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:475374>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Vladimir Dlaka

**DUGOROČNA PROGNOZA MORSKIH VALOVA U  
JADRANSKOM MORU**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.

Građevinski fakultet

Vladimir Dlaka

**DUGOROČNA PROGNOZA MORSKIH VALOVA U  
JADRANSKOM MORU**

DIPLOMSKI RAD

Mentor:  
prof. dr. sc. Dalibor Carević

Zagreb, 2024.

Izjava o autorstvu rada

Potvrđujem da sam osobno napisao rad DUGOROČNA PROGNOZA MORSKIH VALOVA U JADRANSKOM MORU i da sam njegov autor.

Svi dijelovi rada, nalazi ili ideje koje su u radu citirane ili se temelje na drugim izvorima jasno su označeni kao takvi te su adekvatno navedeni u popisu literature.

Ime i prezime: Vladimir Dlaka

Mjesto i datum: Zagreb, 2024.

Naslov rada: Dugoročna prognoza morskih valova u Jadranskom moru

Student: Vladimir Dlaka

Mentor: izv. prof. dr. sc. Dalibor Carević

Studijski program i smjer: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Hidrotehnika

#### Sažetak

Prikazani su rezultati dobiveni modelom ERA5 u sustavu Copernicus za posljednjih 30 godina na području otvorenog mora na koordinatama 44°44'45" N i 13°10'2" E. Napravljena je analiza tih rezultata i uzet je period od 01/11/2007 do 31/12/2008 za usporedbu s rezultatima dobivenim s valografske plutače na istim koordinatama. Od važnosti su bili podaci o značajnoj valnoj visini, vršnom periodu i o smjeru nailaska vala. Određen je i definiran koeficijent determinacije koji govori o razini poklapanja rezultata. Za kraj je napravljena dugoročna analiza, ali samo iz smjera jugo za promatranu točku u Jadranskom moru, te je napisan zaključak o dobivenim rezultatima.

Ključne riječi: vjetrovni valovi, valografska plutača, mjerenje, značajna valna visina, vršni period, ERA5, Copernicus, dugoročna prognoza

Title: Forecast of the sea waves in Adriatic sea

Student: Vladimir Dlaka

Mentor: izv. prof. dr. sc. Dalibor Carević

Study programme/course: University of Zagreb, Faculty of Civil engineering, Hydrotechnics

### Summary

The results obtained from the ERA5 model in the Copernicus system for the last 30 years in the open sea area at coordinates 44°44'45" N and 13°10'2" E are presented. An analysis of these results was carried out, and the period from 01/11/2007 to 31/12/2008 was selected for comparison with results obtained from a wave buoy at the same coordinates. The data on significant wave height, peak period, and wave direction were of importance. The coefficient of determination, which indicates the level of agreement between the results, was determined and defined. Finally, a long-term analysis was conducted, but only for waves coming from the southeast (jugo) for the observed point in the Adriatic Sea, and a conclusion about the obtained results was written.

Key words: wind waves, wave buoy, measurement, significant wave height, peak period, ERA5, Copernicus, forecast

## Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	10
<b>1.1. VJETROVNI VALOVI</b> .....	11
<b>1.2. STATISTIČKI OPIS VJETROVNIH VALOVA</b> .....	12
<b>2. OPIS RADA VALOGRAFSKE PLUTAČE</b> .....	14
<b>3. PRIKAZ REZULTATA MJERENJA VALOGRAFSKOM PLUTAČOM</b> .....	17
<b>3.1. ZNAČAJNA VALNA VISINA I VRŠNI PERIOD</b> .....	17
<b>3.2. STRMOST VALA</b> .....	20
<b>4. PRIKAZ DOSTUPNIH VALNIH PARAMETARA IZ COPERNICUS BAZE PODATAKA</b> .....	21
<b>4.1 COPERNICUS</b> .....	21
<b>4.2 ERA 5</b> .....	22
<b>4.3 MODELIRANI PODACI KROZ PERIOD OD 30 GODINA</b> .....	23
<b>4.4. MODELIRANI PODACI ZA PERIOD RADA PLUTAČE</b> .....	31
<b>5. ANALIZA ODNOSA VALNIH VISINA I PERIODA</b> .....	33
<b>5.1. USPOREDBA IZMJERENIH I MODELIRANIH ZNAČAJNIH VALNIH VISINA</b> .....	33
<b>5.2. USPOREDBA IZMJERENIH I MODELIRANIH VRŠNIH PERIODA</b> .....	40
<b>5.3. USPOREDBA MODELIRANIH I IZMJERENIH ODNOSA STRMOSTI I ZNAČAJNE VALNE VISINE</b> .....	41
<b>6. FORMIRANJE UZORKA ZA DUGOROČNU PROGNOZU</b> .....	42
<b>6.1. METODE ZA FORMIRANJE UZORKA</b> .....	42
<b>6.2. METODA GODIŠNJIH EKSTREMA</b> .....	43
<b>7. DUGOROČNA PROGNOZA</b> .....	46
.....	48
<b>8. ZAKLJUČAK</b> .....	50
<b>9. LITERATURA</b> .....	52
<b>10. PRILOZI</b> .....	53

## POPIS SLIKA

<b>Slika 1.</b> Valografska plutača Waverider MKIII.....	13
<b>Slika 2.</b> Pozicija plutače V1 na Otvorenom moru.....	14
<b>Slika 3.</b> Značajna valna visina $H_s$ izmjerena na plutači u točki V1.....	17
<b>Slika 4.</b> Vršni period vala $T_p$ izmjeren na plutači u točki V1.....	18
<b>Slika 5.</b> Pripadni period vala najvećih značajnih valnih visina na poziciji V1.....	19
<b>Slika 6.</b> Strmost vala u odnosu na značajnu valnu visinu u točki V1.....	20
<b>Slika 7.</b> Značajna valna visina u točki V1 kroz posljednjih trideset godina.....	23
<b>Slika 8.</b> Maksimalne značajne valne visine za razdoblje od trideset godina.....	25
<b>Slika 9.</b> Vršni periodi vala u točki V1 kroz posljednjih trideset godina.....	26
<b>Slika 10.</b> Analiza vršnih perioda i značajnih valnih visina u točki V1 kroz period od 30 godina.....	26
<b>Slika 11.</b> Smjer nailaska vala u točki V1 kroz posljednjih 30 godina.....	27
<b>Slika 12.</b> Ovisnost značajne valne visine o smjeru nailaska vala.....	28
<b>Slika 13.</b> Ovisnost vršnih perioda o smjeru nailaska vala.....	29
<b>Slika 14.</b> Značajne valne visine za period od 01/11/2007 do 31/12/2008 (model).....	30
<b>Slika 15.</b> Vršni period valova u razdoblju od 01/11/2007 do 31/12/2008 (model).....	32
<b>Slika 16.</b> Strmost vala u razdoblju od 01/11/2007 do 31/12/2008 (model).....	32
<b>Slika 17.</b> Odnos izmjerenih i modeliranih vrijednosti značajne valne visine.....	36
<b>Slika 18.</b> Odnos izmjerenih i modeliranih vrijednosti značajne valne visine u vremenu za jednu valnu situaciju kada je valna situacija definirana modelom ERA5.....	37
<b>Slika 19.</b> Odnos izmjerenih i modeliranih vrijednosti značajne valne visine u vremenu za jednu valnu situaciju kada je valna situacija definirana očitanjima s plutače.....	37
<b>Slika 20.</b> Usporedba značajnih valnih visina modela i izmjerenih valnih visina.....	38
<b>Slika 21.</b> Usporedba vršnog perioda modela i izmjerenih valnih visina.....	39
<b>Slika 22.</b> Usporedba odnosa strmosti valova i značajne valne visine preko modela i preko plutače .....	40
<b>Slika 23.</b> Učestalost pojavljivanja određenog razreda značajnih valnih visina.....	44



**Slika 24.** Dugoročna prognoza značajne valne visine na otvorenom moru .....47

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 1.</b> Maksimalne značajne valne visine za svaku godinu u promatranom periodu.....	24
<b>Tablica 2.</b> Maksimalni vršni periodi valova za svaku godinu za promatrano razdoblje.....	27
<b>Tablica 3.</b> Maksimalne značajne valne visine svih valnih zapisa izmjerenih na modelu.....	34
<b>Tablica 4.</b> Maksimalne značajne valne visine svih valnih zapisa izmjerenih na plutači.....	36
<b>Tablica 5.</b> Maksimalne značajne valne visine za pojedine valne situacije iz smjera jugo po godinama od 1993. do 2003.....	43
<b>Tablica 6.</b> Dugoročna analiza- vjerojatnost premašenja za točku V1 iz dostupnih podataka o značajnoj valnoj visini numeričkog modela ERA5 od 1993. do 2023.....	45
<b>Tablica 7.</b> Vrijednosti značajne valne visine za određena povratna razdoblja.....	48

# 1.UVOD

Da bi neka pomorska građevina bila ispravna i kvalitetna mora funkcionirati u prirodnom okruženju, gdje je izložena vjetru, valovima, plimnim strujama i potresima. Da bi se osigurala njena učinkovitost, provode se detaljna istraživanja okolišnih uvjeta. Valovi su kompleksni i promjenjivi, što otežava njihovo potpuno predviđanje.

Poznavanje vjetrovalne klime ključno je za proračun stabilnosti hidrotehničkih konstrukcija i analizu dinamičkih opterećenja uzrokovanih valovima. Za pomorske građevine važni su podaci o smjeru, brzini, trajanju i učestalosti vjetra. U Jadranskom moru na smjer i oblik valova utječu otoci i batimetrija, zbog relativno malih dubina. Na obali se često grade lukobrani, gdje je značajna valna visina ključni parametar. Zato je potrebno kontinuirano pratiti vjetrovalnu klimu na različitim lokacijama i tijekom dugih vremenskih razdoblja.

Obično se procjenjuje značajna valna visina za povratna razdoblja od 1, 2, 5, 10, 20, 50 i 100 godina, što označava visinu vala koja bi mogla biti dostignuta ili premašena barem jednom u tom razdoblju. Proces prijenosa energije s vjetra na valove i generiranje valnih spektara dobro je opisan numeričkim modelima, no još uvijek nije potpuno razjašnjen. Značajna valna visina odnosi se na prosječnu visinu jedne trećine najviših valova. Period vala označava vrijeme između prolaska dvaju uzastopnih valnih grebena kroz istu točku. Visina i duljina vala mijenjaju se s dubinom, dok period ostaje nepromijenjen. Mjerenje valova s valografima zahtijeva puno vremena i novca, a podaci vrijede samo za točno određeno područje.

Za operativno planiranje građevinskih radova potrebno je kratkoročno predviđanje visine valova u stvarnom vremenu za nadolazeće sate i dane, temeljem trenutnih uvjeta mora. Podaci o značajnim visinama valova i vršnom periodu vala, dobiveni modelom, analizirati će se u MS Excelu i MATLAB-u. MATLAB je programski jezik i okruženje za numeričke izračune, analizu podataka i vizualizaciju. Koristi se u raznim područjima, poput inženjerstva, znanosti i istraživanja, za rješavanje matematičkih zadataka, modeliranje i simulacije. Ime MATLAB dolazi od "MATrix LABORatory" jer je prvobitno bio namijenjen radu s matricama. Danas obuhvaća širok raspon primjena, uključujući strojno učenje, obradu signala i slike te financijsku analizu. Ističe se jednostavnošću upotrebe i snažnim alatima za analizu i prikaz podataka. [1]

U ovom radu analizirat će se podaci izmjereni valografskom plutačom koja je postavljena u Jadranskom moru na koordinatama 44°44'45" N 13°10'5" E, podaci koje je model izračunao, te će se usporediti podatke da se provjeri vjerodostojnost modela. Nakon toga će se napraviti dugoročna prognoza valova za povratno razdoblje od dvije, pet, deset, dvadeset, pedeset i sto godina.

## 1.1. VJETROVNI VALOVI

Vjetrovni valovi nastaju kada vjetar puše preko površine vode. Trenje između vjetra i vode prenosi energiju na vodu, što uzrokuje formiranje malih valova, poznatih kao kapilarni valovi. Ovi mali valovi su kratkotrajni i imaju ograničenu visinu. Kako vjetar nastavlja puhati, kapilarni valovi rastu i razvijaju se u veće valove. Ovaj proces rasta, poznat kao "rast valova," odvija se kada energija vjetra dodatno podiže i produbljuje valove. Visina valova ovisi o brzini, trajanju vjetra i veličini područja na kojem vjetar puše. [10]

Ključne karakteristike vjetrovnih valova uključuju duljinu vala, visinu vala i period vala. Duljina vala označava razmak između uzastopnih vrhova valova i može varirati od nekoliko metara do više od 100 metara, ovisno o uvjetima vjetra i duljini privjetrišta. Visina vala predstavlja vertikalnu udaljenost između grebena i žlijeba vala i također ovisi o brzini vjetra, trajanju i duljini privjetrišta. Jači i dugotrajniji vjetrovi obično stvaraju veće valove. Period vala je vrijeme koje je potrebno da dva uzastopna vrha vala prođu kroz istu točku. Duži period vala obično nastaje s jačim vjetrovima i većim privjetrištem. [10]

Vjetrovni valovi često putuju u grupama, poznatim kao "valne grupe," gdje su valovi raspoređeni i putuju zajedno, koncentrirajući energiju. Kako se valovi udaljavaju od izvora, dolazi do disperzije, pri čemu duži valovi putuju brže od kraćih i organiziraju se u različite grupe. Kada valovi dolaze u pliće vode blizu obale, usporavaju i povećavaju se u visini zbog smanjenja dubine, što može uzrokovati lomljenje valova. Također, kada valovi naiđu na prepreke ili se odbiju od obale, mogu se vratiti i stvoriti složene uzorke valova. U radu su analizirane različite karakteristike vjetrovnih dubokovodnih valova. [10]

## 1.2. STATISTIČKI OPIS VJetrovNIH VALOVA

Valovi su prirodno nasumična pojava, pa se njihovo ponašanje često opisuje statističkim distribucijama: Rayleighova distribucija koristi se za opis visina valova. Smatra se da valovi u homogenom moru slijede Rayleighovu distribuciju, što znači da visine valova imaju predvidiv obrazac, pri čemu samo mali broj valova doseže iznimno velike visine. Weibullova distribucija koristi se za modeliranje ekstremnih visina valova. Ova distribucija prilagođava se podacima iz ekstremnih uvjeta i pomaže u procjeni vjerojatnosti pojave velikih valova u određenom vremenskom razdoblju. Normalna distribucija koristi se za opisivanje perioda valova. Pretpostavlja se da periodi valova imaju središnju vrijednost oko koje se frekvencija valova raspodjeljuje simetrično. U sklopu ovog diplomskog rada najzanimljivija je Rayleighova distribucija, pa će se o njoj nešto više napisati. Kao što je već rečeno vjerojatnost nastupa određene valne visine u nekom valnom zapisu (5-15min.) se teorijski opisuje Rayleigh-ovom funkcijom gustoće vjerojatnosti. Vjerojatnost nastupa ili prekoračenja neke valne visine  $H_i$  jednaka je  $P(H \geq H_i) = \exp(-2(H_i/H_s)^2)$ . [2]

Kod uzorka od  $N_0$  valova valne visine vrijede određene formule. Pod brojevima (1), (2) i (3) redom su prikazane: Desetinska valna visina, odnosno prosjek od 1/10 najviših valnih visina u jednom valnom zapisu opsega  $N_0$  valova, zatim značajna valna visina, odnosno prosjek od 1/3 najviših valnih visina te na kraju prosječna valna visina.

$$H_{1/10} = \frac{1}{N_0/10} \sum_{i=1}^{N_0/10} H_i^{opad.niza} \quad (1)$$

$$H_{1/3} = H_s = \frac{1}{N_0/3} \sum_{i=1}^{N_0/3} H_i^{opad.niza} \quad (2)$$

$$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i \quad (3)$$

Pomoću Rayleighove funkcije mogu se usvojiti idući omjeri:

$$H_{\max} \approx 2H_s = 2,82 H_{rms} = 3,25 H \quad (4)$$

$$H_{1/10} = 1,27 H_{1/3} = 2,03 \bar{H}; H_{1/3} = 1,60 H \quad (5)$$

$$H_{1/3} = H_s = 2H_{rms} = 1,63H \quad (6)$$

Pod brojevima (7), (8) i (9) redom su prikazane: Desetinski valni period, odnosno prosjek od 1/10 najvećih valnih perioda u jednom valnom zapisu opsega  $N_0$  valova, zatim značajni valni period, odnosno prosjek od 1/3 najviših valnih perioda, te na kraju prosječni valni period.

$$T_{1/10} = \frac{1}{N_0/10} \sum_{i=1}^{N_0/10} T_{oi}^{opad.niza} \quad (7)$$

$$T_{1/3} = T_s = \frac{1}{N_0/3} \sum_{i=1}^{N_0/3} T_{oi}^{opad.niza} \quad (8)$$

$$\bar{T} = \check{T}_0 = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_{oi} \quad (9)$$

Valni period ne prati zakon raspodjele kao što je slučaj kod valnih visina kod Rayleighove distribucije. [2]

$$T_{\max} \approx T_S \approx 1,1T \quad (10)$$

## 2. OPIS RADA VALOGRAFSKE PLUTAČE

Plutače za mjerenje valova su specijalizirani uređaji koji plutaju na vodi i prikupljaju podatke o svojstvima morskih valova. Ove plutače igraju ključnu ulogu u oceanografskim istraživanjima, sigurnosti pomorskog prometa, obalnom inženjerstvu i proučavanju klimatskih promjena jer pružaju točne i pravovremene informacije o uvjetima na moru. Korištenjem akcelerometra i senzora pokreta, plutače prate svoje kretanje na površini valova, omogućujući izračun visine, smjera i perioda valova. Neke plutače koriste GPS ili kompase za veću preciznost u određivanju smjera. Napredni modeli, poput Datawell Waveridera, mogu mjeriti i spektralnu raspodjelu valova, pružajući detaljan uvid u energetska raspodjelu valova iz različitih smjerova. [3]

Mnoge plutače koriste solarne panele i punjive baterije, omogućujući im dugotrajan autonomni rad bez potrebe za vanjskim izvorima energije. Podaci koje prikupljaju pomažu u donošenju važnih navigacijskih odluka, osobito u izazovnim vremenskim uvjetima, čime se smanjuje rizik za brodove. Ovi podaci također se koriste za planiranje i zaštitu obalne infrastrukture, poput lukobrana i luka, te doprinose dugoročnim istraživanjima klimatskih promjena i promjena razine mora. Plutače za mjerenje valova ključan su dio meteoroloških modela jer osiguravaju podatke potrebne za predviđanje oluja i valova. [3]

Ove plutače su nezamjenjivi alati za razumijevanje i predviđanje ponašanja oceana, čineći ih ključnima za znanstvene, sigurnosne i inženjerske svrhe.

Waverider MKIII tvrtke Datawell je napredna plutača za mjerenje valova, dizajnirana za precizno praćenje i bilježenje karakteristika oceanskih valova. Ova vrsta plutače široko se koristi u oceanografskim istraživanjima, pomorskoj sigurnosti i inženjerskim primjenama zbog svoje pouzdanosti i točnosti u prikupljanju podataka o valovima. [3]

Uređaj koristi napredne akcelerometre i senzore pokreta za mjerenje visine, smjera i perioda valova. Sustav primarno prati vertikalna ubrzanja kako bi izračunao visinu valova, dok analizira horizontalno i vertikalno gibanje za određivanje smjera i perioda valova. Mjerenja se temelje na orbitalnom gibanju čestica vode u valovima, što omogućuje prikupljanje vrlo preciznih podataka o dinamici valova. [3]

Model MKIII sposoban je mjeriti spektar usmjerenih valova, što omogućuje detaljnu analizu raspodjele energije valova u različitim smjerovima. To se postiže kombinacijom troosnog akcelerometra i kompasa ili GPS sustava, koji prate kretanje plutače u svim trima dimenzijama. Može prenositi podatke u stvarnom vremenu putem satelita (kao što su Iridium, Inmarsat ili GSM) ili radio veza, što ga čini idealnim za udaljena ili pučinska područja. Podaci se prenose do obalne postaje ili kontrolnog centra, gdje se mogu obrađivati i analizirati u stvarnom vremenu ili pohraniti za kasniju upotrebu. [3]

Plutača je obično napajana solarnim panelima u kombinaciji s punjivim baterijama, što omogućuje dugotrajno funkcioniranje bez vanjskih izvora energije. Ovo održivo rješenje napajanja podržava njezin autonomni rad, posebno u udaljenim ili pučinskim područjima.

Korištena u pomorskoj sigurnosti, offshore inženjeringu i istraživanjima, pomaže u predviđanju uvjeta valova, projektiranju obalnih konstrukcija, proučavanju učinaka klimatskih promjena i praćenju stanja mora za brodarstvo i naftne platforme. [3]

Tehničke specifikacije:

- Frekvencijski raspon: 0.03 – 1.00 Hz
- Točnost visine valova:  $\pm 1\%$  ili  $\pm 0.01$  m
- Točnost perioda valova:  $\pm 1\%$  izmjerenog perioda
- Točnost smjera:  $\pm 2^\circ$

Još neki od zanimljivih dijelova dodatne opreme koju ima plutača:

- GPS za nadzor i praćenje plutače putem HF veze
- unutarjni zapisivač podataka
- prekidač za napajanje
- LED bljeskalica antene
- Inteligentna testna kutija
- sferični trup promjera 0,9 m (0,7 m) od AISI 316
- opcionalni Cunifer trup
- vijek trajanja baterije 3,5 godine (1,2 godine) [3]



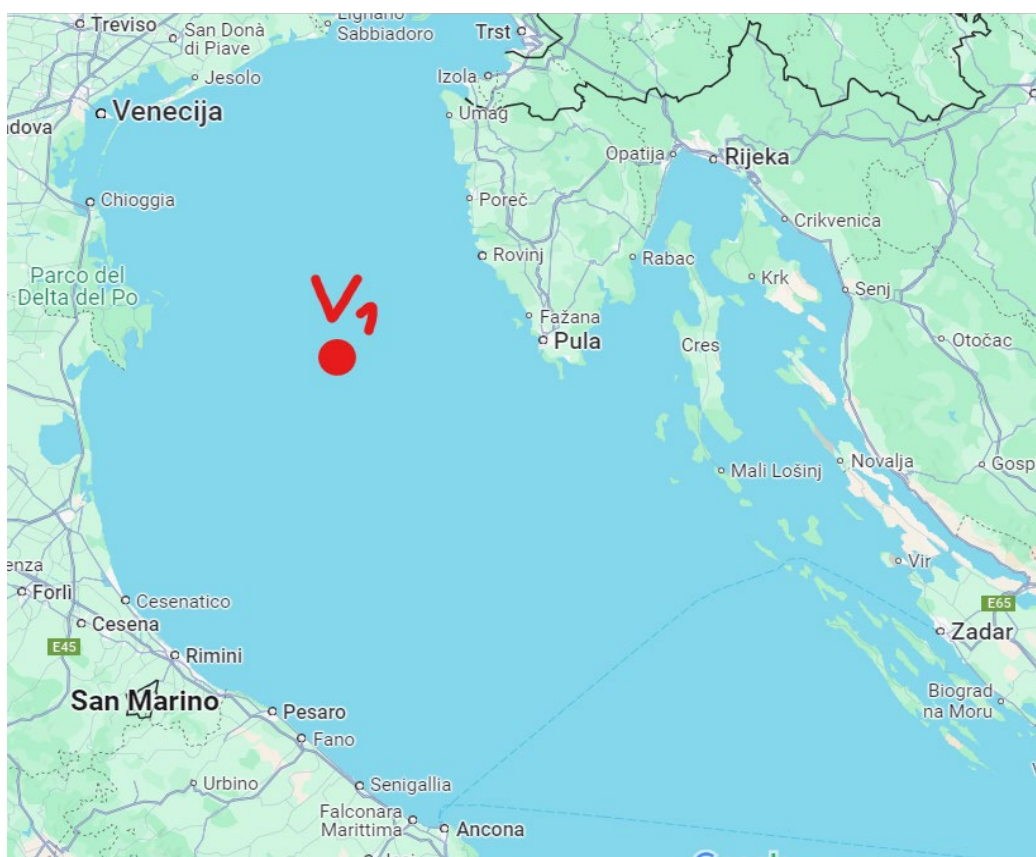
**Slika 1.** Valografska plutača Waverider MKIII [3]



Slika 2. prikazuje lokaciju valografske plutače za koju su dostupni podaci o značajnim visinama valova. Plutača V1 smještena je na koordinatama 13,10° istočne geografske dužine i 45,44° sjeverne širine, u otvorenom moru Sjevernog Jadrana. Zahvaljujući toj poziciji, plutača ima široko privjetrište bez utjecaja otoka.

Podaci za plutaču dostupni su za razdoblje od 1.11.2007. do 31.12.2008., iako nedostaju određeni zapisi u 2008. godini – od 5. veljače do 1. travnja te od 8. kolovoza do 17. rujna, kao i jedan tjedan u rujnu, listopadu i studenom. Ovi izostanci čine manje od 1,05% podataka, što nije značajno utjecalo na analize.

Dostupni su podaci o značajnim valnim visinama i vršnom periodu vala, ali ne i o smjeru valova. Situacija vjetra i valova opisuje promjene brzine vjetra i visine valova tijekom ciklusa koji može trajati od nekoliko sati do nekoliko dana. U inženjerske svrhe važan je kraći stacionarni period od 5 do 15 minuta, tijekom kojeg su statistički parametri valova konstantni, što se naziva "stacionarno stanje mora".

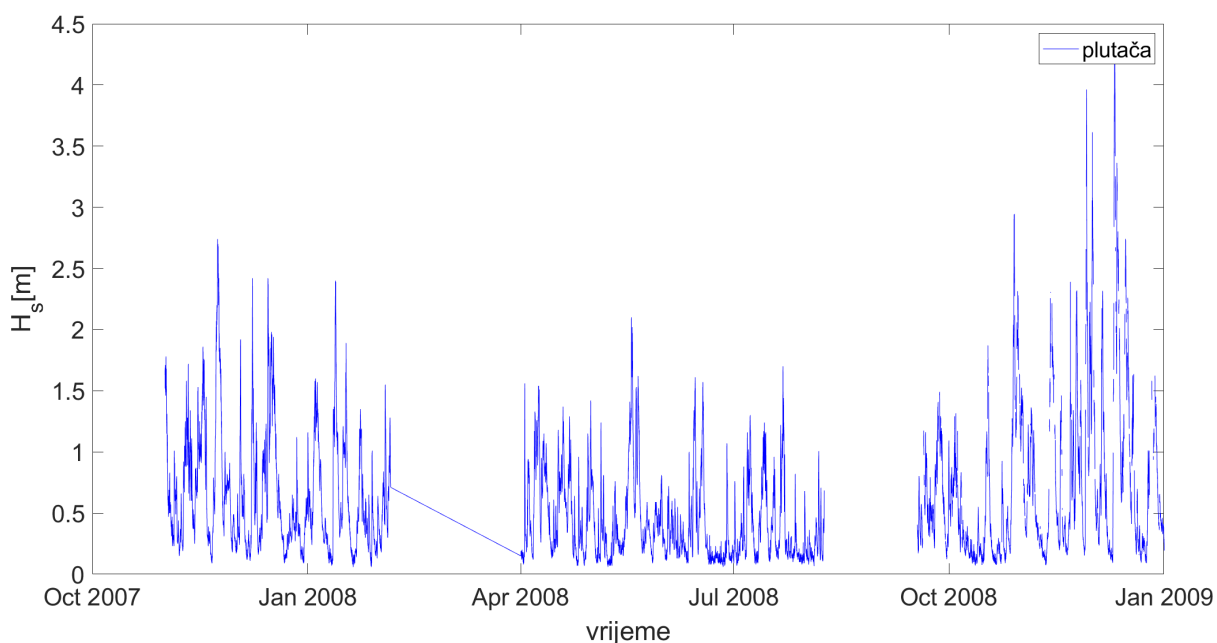


Slika 2. Pozicija plutače V1 na Otvorenom moru.

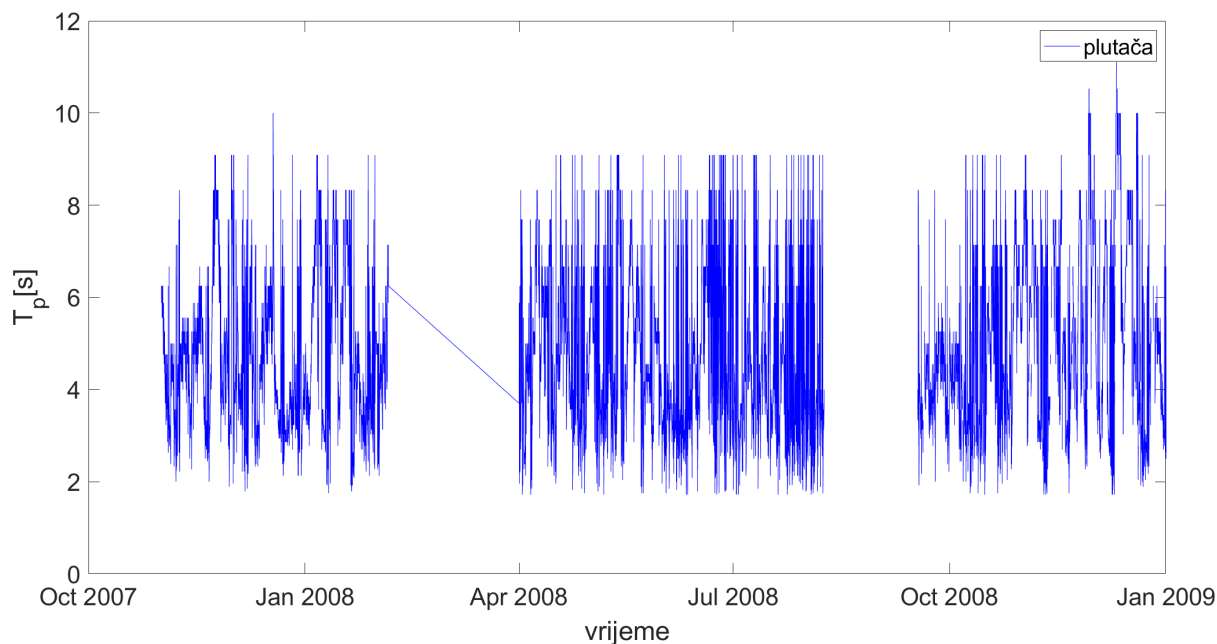
### 3. PRIKAZ REZULTATA MJERENJA VALOGRAFSKOM PLUTAČOM

#### 3.1. ZNAČAJNA VALNA VISINA I VRŠNI PERIOD

Na sljedećim slikama prikazana je vremenska serija zapisa značajnih valnih visina i vršnih perioda za valografsku postaju V1 u razdoblju 1.11.2007. –31.12.2008. Na x-osi je vrijeme, dok su na y-osi značajna valna visina u metrima i vršni periodi vala u sekundama. Prikazani grafovi izrađeni su u programu MATLAB. U daljnjem tekstu obrađene su valne situacije u kojima se pojavila maksimalna značajna valna visina.



**Slika 3.** Značajna valna visina H<sub>s</sub> izmjerena na plutači u točki V1



**Slika 4.** Vršni period vala  $T_p$  izmjeren na plutači u točki V1

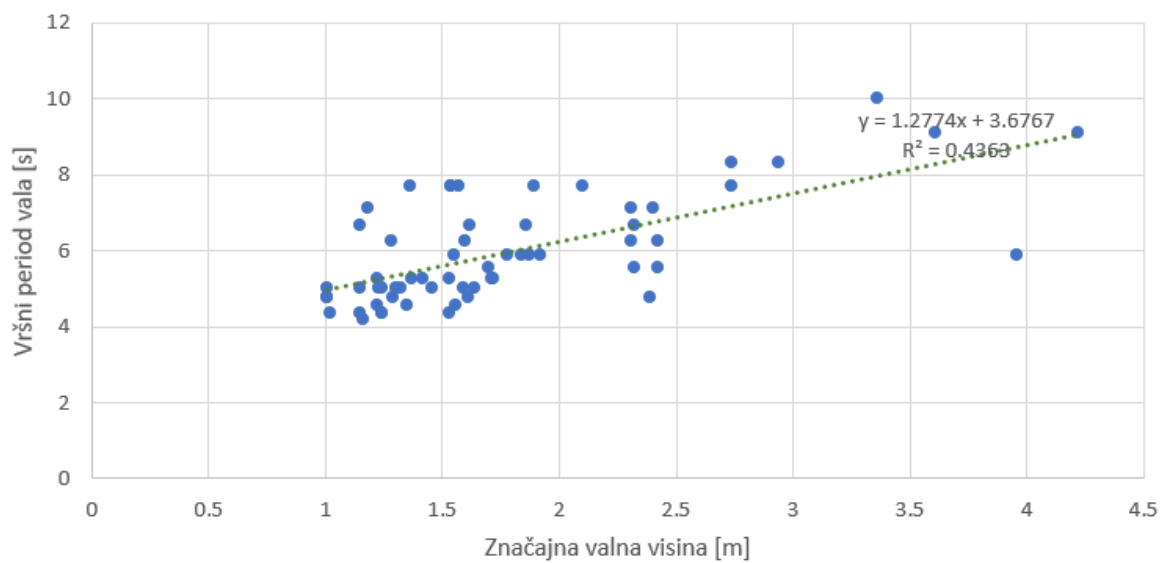
Za analizu će se izdvojiti najveće značajne valne visine  $H_s$  za svaku valnu situaciju u navedenim periodima.

Valovi manji od jednog metra nisu uzeti u obzir. Plutača V1 mjeri valove, a ukupno 14,7% značajnih valnih visina bilo je veće od jednog metra. Prema tim uvjetima izdvojen je odgovarajući broj valnih situacija  $n=59$ . Iako je broj značajnih valnih visina koje prelaze vrijednost jednog metra veći od 59, mi uzimamo samo onu vrijednost valne situacije koja ima najveći iznos značajne valne visine.

Svaka značajna valna visina  $H_s$  ima svoj pripadni vršni period  $T_p$ . Na slici 5. prikazan je odnos između značajnih valnih visina i vršnih valnih perioda, s  $H_s$  na x-osi i  $T_p$  na y-osi. Analizom je utvrđeno da najvećoj valnoj visini ne pripada uvijek najduži valni period, iako je to u teoriji pravilo, jer periodi mogu biti viši neposredno prije ili nakon najveće značajne valne visine.

Obično, veća valna visina znači i dulji valni period. Ovisnost između značajne valne visine  $H_s$  i vršnog perioda  $T_p$  opisana je koeficijentom determinacije  $R^2$ , koji iznosi 0,44 za za točku V1, što je očekivano zbog prisutnosti većih i duljih valova različitih perioda na otvorenom moru.

Pripadni period vala najvećih značajnih visina



Slika 5. Pripadni period vala najvećih značajnih valnih visina na poziciji V1

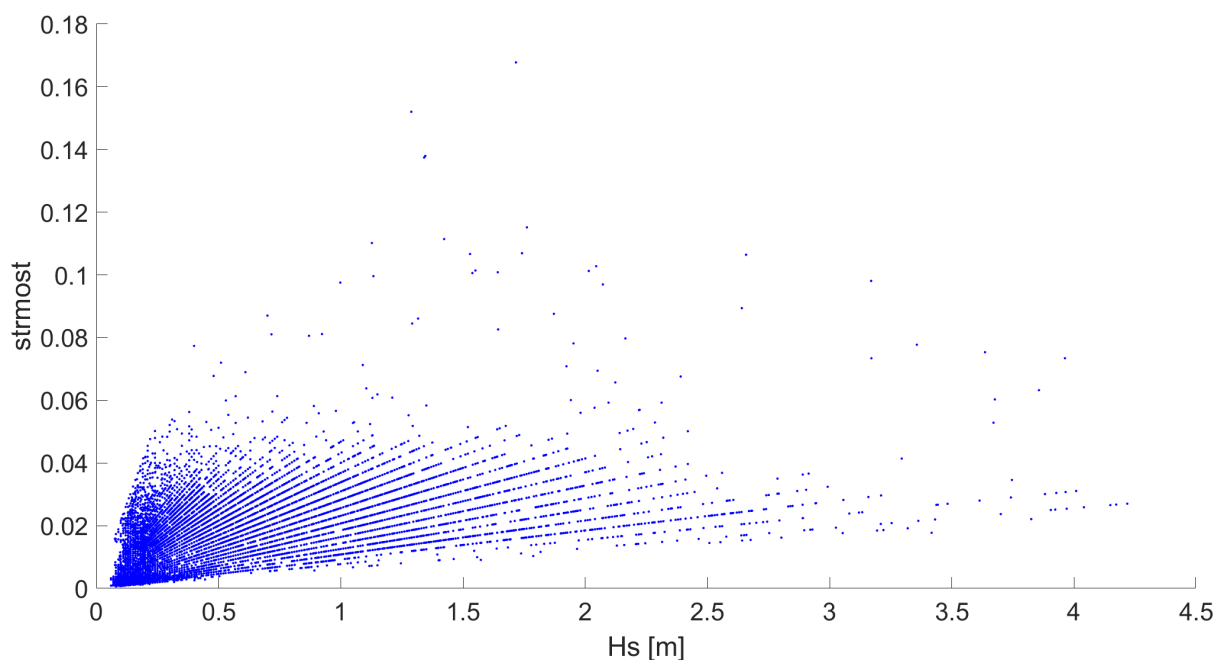
### 3.2. STRMOST VALA

Strmost vala definira se kao omjer značajne valne visine i vršne dužine vala  $H_s/L_p$ . Značajna valna visina i vršni period vala dobiveni su pomoću valografa, dok je vršna dužina vala izračunata prema formuli (1):

$$L_p = \frac{9.81 * T_p^2}{2\pi} \quad (1)$$

Kriterij loma vala ovisi o maksimalnoj strmosti, što znači da kada strmost vala u dubokoj vodi premaši vrijednost 1:7, val postaje nestabilan i lomi se. Nagib morskog dna značajno utječe na to kako dno djeluje na valove kako se približavaju obali, a time i na način na koji se valovi lome. Val se lomi kada brzina vodnih čestica na grebenu vala premaši brzinu širenja vala  $c$ , što uzrokuje probijanje valnog profila. [5]

Na slici 6. prikazani su odnosi između strmosti vala i značajnih valnih visina, gdje je vidljivo da strmost raste s povećanjem valne visine. Na otvorenom moru strmosti valova su manje nego na područjima blizu obale zbog manjka utjecaja morskog dna.



**Slika 6.** Strmost vala u odnosu na značajnu valnu visinu u točki V1

## **4. PRIKAZ DOSTUPNIH VALNIH PARAMETARA IZ COPERNICUS BAZE PODATAKA**

### **4.1 COPERNICUS**

Služba za klimatske promjene Copernicus (C3S) jedna je od glavnih komponenti programa promatranja Zemlje Copernicus, koji provodi Europska unija. Njezin glavni cilj je osigurati visokokvalitetne informacije i podatke povezane s klimatskim promjenama. Ima ključnu ulogu u donošenju odluka o prilagodbi na klimatske promjene i politikama ublažavanja njihovih posljedica, kao i u potpori znanstvenim istraživanjima. Omogućuje pristup sveobuhvatnim, dosljednim i znanstveno utemeljenim podacima o klimi. [6]

Primarna misija C3S-a je podržati strategije Europske unije za prilagodbu i ublažavanje klimatskih promjena pružanjem pouzdanih informacija o prošlim, sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima. Nastoji premostiti jaz između klimatskih istraživanja i njihovih praktičnih primjena, čineći podatke dostupnima donositeljima odluka, poslovnoj zajednici, znanstvenicima i široj javnosti. [6]

Također program nudi praćenje i prognoziranje klimatskih varijabli u stvarnom vremenu. To uključuje sezonske prognoze koje korisnicima pomažu u pripremi za nadolazeće klimatske uvjete te dugoročne projekcije koje su ključne za planiranje budućih infrastrukturnih i političkih mjera. Ove prognoze također pridonose sustavima ranog upozorenja, pomažući u pripremi za ekstremne vremenske uvjete poput toplinskih valova, poplava i suša. [6]

Jedan od glavnih proizvoda C3S-a su skupovi podataka za reanalizu, koji kombiniraju promatračke podatke s klimatskim modelima kako bi se stvorila sveobuhvatna slika globalnih i regionalnih klimatskih uvjeta. Na primjer, ERA5, jedan od najvažnijih skupova podataka, koji je korišten u ovom radu, pruža satne informacije o raznim atmosferskim, kopnenim i oceanskim varijablama od 1950. godine do danas, omogućujući detaljan uvid u promjene klime tijekom vremena. [6]

## 4.2 ERA 5

ERA5 (ECMWF reanalysis) je peta generacija ECMWF-ove reanalize globalne klime i vremenskih prilika za posljednjih osam desetljeća. Podaci su dostupni od 1940. godine. ERA5 zamjenjuje prethodnu reanalizu, ERA-Interim.

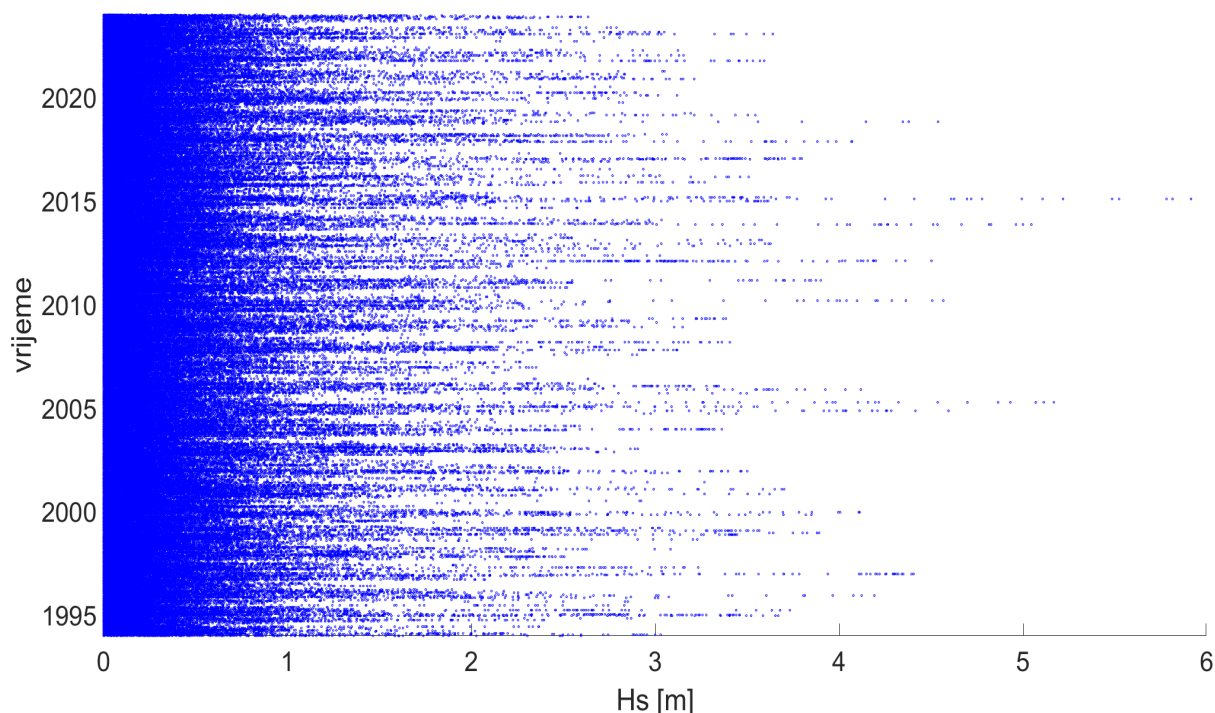
Reanaliza kombinira podatke modela s opažanjima iz cijelog svijeta kako bi stvorila cjelovit i konzistentan globalni skup podataka, koristeći zakone fizike. Ovaj postupak, nazvan asimilacija podataka, temelji se na metodi koju koriste centri za numeričku prognozu vremena, gdje se svakih 12 sati (u ECMWF-u) postojeća prognoza kombinira s novim opažanjima kako bi se dobila optimalna procjena trenutnog stanja atmosfere, poznata kao analiza. Na temelju toga se izdaje ažurirana i poboljšana prognoza. Reanaliza radi na sličan način, ali s nižom rezolucijom, što omogućuje pokrivanje duljih vremenskih razdoblja. Budući da reanaliza nije ograničena potrebom za pravovremenim prognozama, ima više vremena za prikupljanje podataka, a unatrag kroz povijest omogućuje uključivanje poboljšanih verzija izvornih opažanja, čime se povećava kvaliteta reanalize. [6]

Reanaliza pruža satne procjene brojnih atmosferskih, oceansko-valnih i kopnenih površinskih veličina. Procjene nesigurnosti dobivaju se iz osnovne grupe od 10 članova u razmacima od tri sata. Radi lakšeg korištenja, unaprijed su izračunate srednje vrijednosti i rasponi grupe. Te procjene nesigurnosti usko su povezane s razvojem sustava opažanja tijekom vremena. Za potrebe različitih klimatskih primjena, mjesečni prosjeci su unaprijed izračunati, iako nisu dostupni za srednje vrijednosti i raspon grupe. [6]

Koristi se mreža numeričkih elemenata prilagođena na redovnu lat-lon mrežu s razmakom od 0,25 stupnjeva za reanalizu i 0,5 stupnjeva za procjenu nesigurnosti (odnosno 0,5 i 1 stupanj za podatke na oceanima). Postoje četiri glavna podskupa: satni i mjesečni podaci, na razinama tlaka (gornji slojevi atmosfere) i na pojedinačnim razinama (atmosferski, oceansko-valni i kopneni podaci). [6]

### 4.3 MODELIRANI PODACI KROZ PERIOD OD 30 GODINA

Skinuti su podaci sa Copernicus stranice za svaki sat posljednjih 30 godina (1993-2023), značajna valna visina ( $H_s$ , slika 7.), vršni period vala ( $T_p$ , slika 9.) i smjer djelovanja vala ( $\theta_m$ , slika 11.). Poznata je koordinata plutače pa je bilo moguće točno odrediti za koje područje se trebaju očitati rezultati. Nakon par sati podaci su bili spremni i izvučeni preko programa Matlab, te automatski prebačeni u tablicu u Excelu. Kada su izvučeni svi podaci i stavljeni u Excel file napokon je bilo moguće analizirati ponašanje i eventualne promjene u karakteristikama valova u točki V1 u moru. Na sljedećim slikama prikazana je tridesetogodišnja vremenska serija zapisa značajnih valnih visina, perioda vala i smjera nadolaska valova za valografsku postaju V1. Na slici 7. se na x osi nalazi značajna valna visina, dok se na y osi nalazi vrijeme. U ostala 2 grafa na x osi se nalazi vrijeme, a na y osi smjer djelovanja valova u stupnjevima i vršni period u sekundama. Kasnije će biti uspoređen dio podataka modela u istom vremenskom periodu u kojem su dobiveni podaci s plutače.



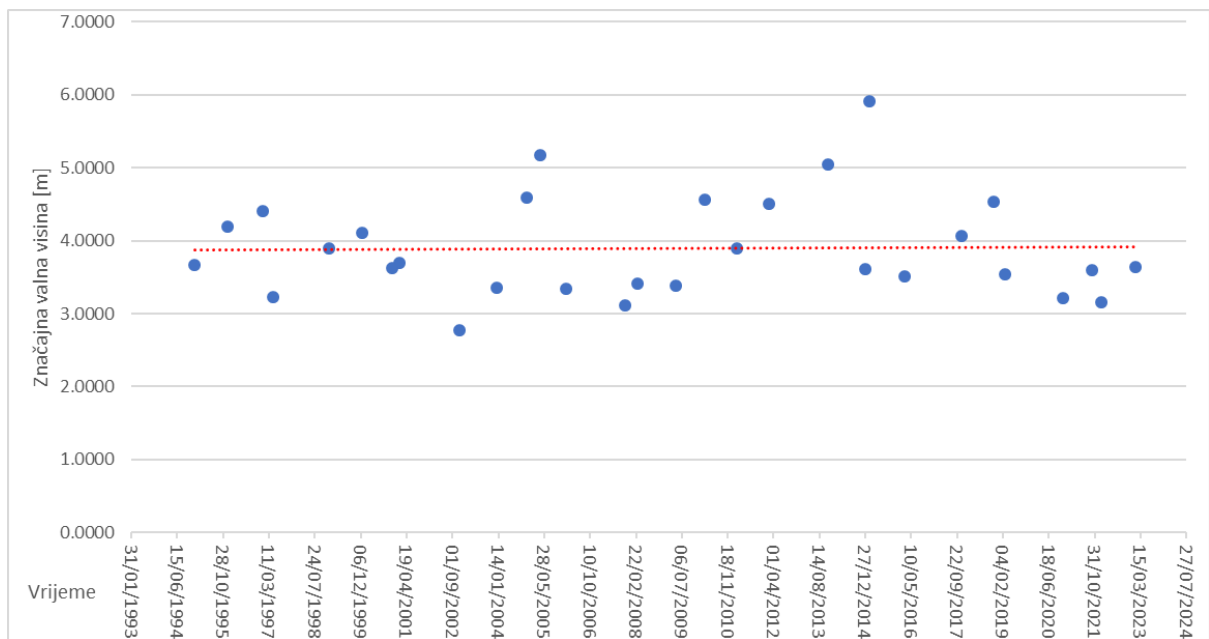
**Slika 7.** Značajna valna visina u točki V1 kroz posljednjih trideset godina

Vidljiv je trend smanjenja i povećanja značajne valne visine ovisno o godišnjim dobima, tj. o vremenskim prilikama, od kojih su najvažnije smjer i brzina vjetra. Kao što je prikazano u tablici 1 većinom se maksimalne značajne valne visine kreću u intervalu od 3 do 4.5 metara. Od ekstremnih vrijednosti valja izdvojiti 2015. godinu i to datum 06/02/2015 u 04:00 ujutro kad je značajna valna visina dosegla čak 5.91 metar, kao i 11/11/2013 oko 17:00 kad je značajna valna visina iznosila 5.04 metra i 11/04/2005 u 06:00 kad je iznosila 5.16 m. Vidljivo je također da se sve ekstremne pojave dešavaju u zimskim ili eventualno kasnim jesenskim mjesecima. Na slici 8. je prikazan graf tih istih maksimalnih značajnih valnih visina.



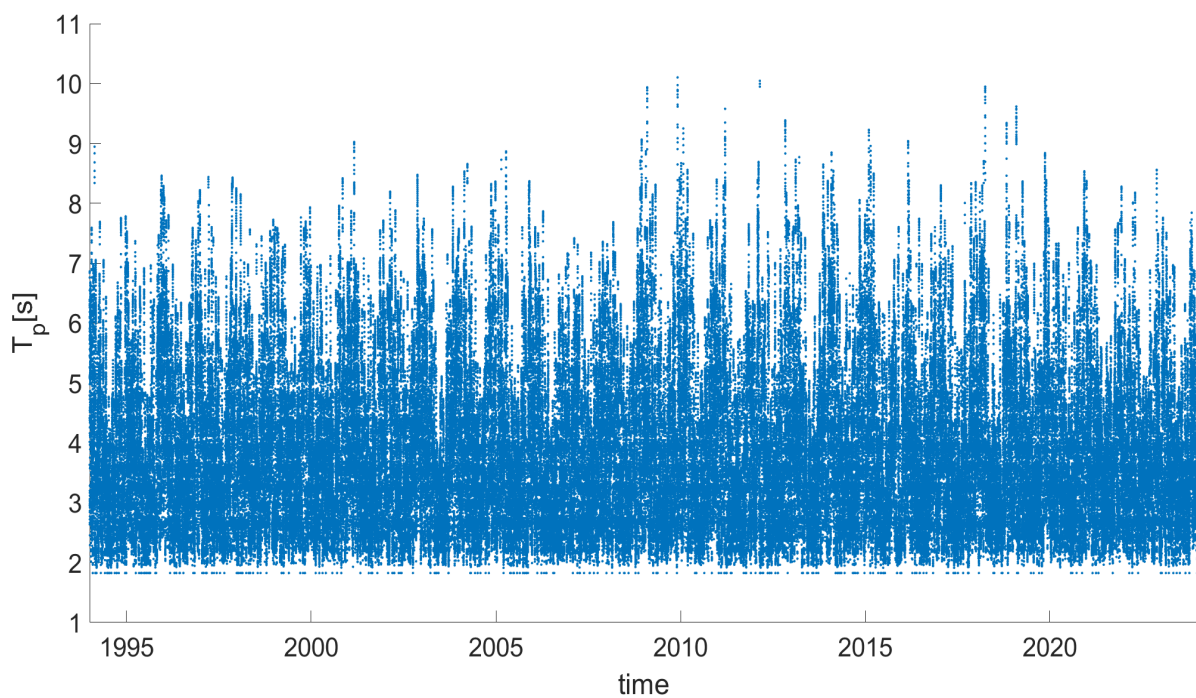
**Tablica 1.** Maksimalne značajne valne visine za svaku godinu u promatranom periodu

Maksimalne godišnje značajne valne visine i pripadni vršni periodi			
	vrijeme	Hs (m)	Tp (s)
1	23/01/2023 11:00	3.6392	7.6087
2	11/01/2022 22:00	3.1534	6.9828
3	07/10/2021 08:00	3.5926	7.5052
4	21/11/2020 00:00	3.2120	7.1566
5	23/02/2019 06:00	3.5443	7.6327
6	29/10/2018 17:00	4.5377	8.7455
7	13/11/2017 17:00	4.0698	8.3177
8	29/02/2016 02:00	3.5080	8.6175
9	06/02/2015 04:00	5.9140	9.1800
10	31/12/2014 13:00	3.6148	7.7259
11	11/11/2013 17:00	5.0453	8.5155
12	10/02/2012 21:00	4.5024	8.4764
13	02/03/2011 06:00	3.9000	8.2030
14	10/03/2010 05:00	4.5667	8.4964
15	27/04/2009 21:00	3.3839	8.2540
16	05/03/2008 21:00	3.4052	7.4647
17	22/10/2007 04:00	3.1187	6.9969
18	23/01/2006 06:00	3.3445	7.1156
19	11/04/2005 06:00	5.1677	8.7640
20	14/11/2004 09:00	4.5948	8.2337
21	24/12/2003 01:00	3.3617	7.3719
22	16/11/2002 13:00	2.7761	8.3880
23	30/01/2001 08:00	3.7008	7.7855
24	06/11/2000 20:00	3.6215	8.1581
25	20/12/1999 13:00	4.1116	7.7596
26	21/12/1998 18:00	3.8909	7.7201
27	21/04/1997 21:00	3.2338	7.5746
28	27/12/1996 03:00	4.4045	8.1395
29	13/12/1995 17:00	4.1916	8.3338
30	23/12/1994 06:00	3.6686	7.7503

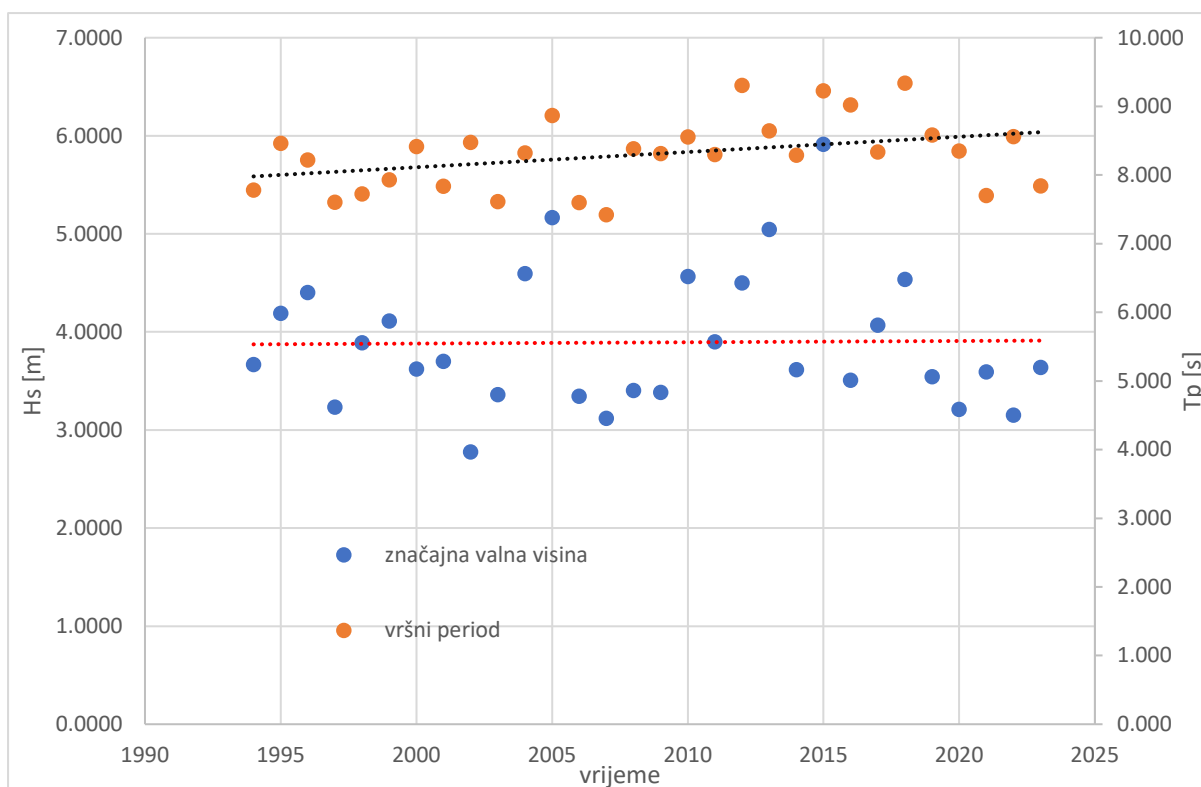


**Slika 8.** Maksimalne značajne valne visine za razdoblje od trideset godina.

Na slici 8 su prikazane maksimalne godišnje valne visine za posljednjih trideset godina. Konstruirana je crta trenda da bi se analiziralo ponašanje kroz godine i postoji li porast ili pad maksimalnih značajnih valnih visina kroz godine. Sa grafa se može zaključiti da je porast minimalan, skoro neprimjetan. Porastao je sa nekih 3.90 metara na 3.95 metara. Postoje oscilacije u najvećim valnim visinama gdje u par godina maksimum pređe s manje od tri metra visine(2002.) na više od pet metara(2005.). Ipak za bolju analizu i više primjetne rezultate trebalo je uzeti veći period godina.



**Slika 9.** Vršni periodi vala u točki V1 kroz posljednjih trideset godina.



**Slika 10.** Analiza vršnih perioda i značajnih valnih visina u točki V1 kroz period od 30 godina

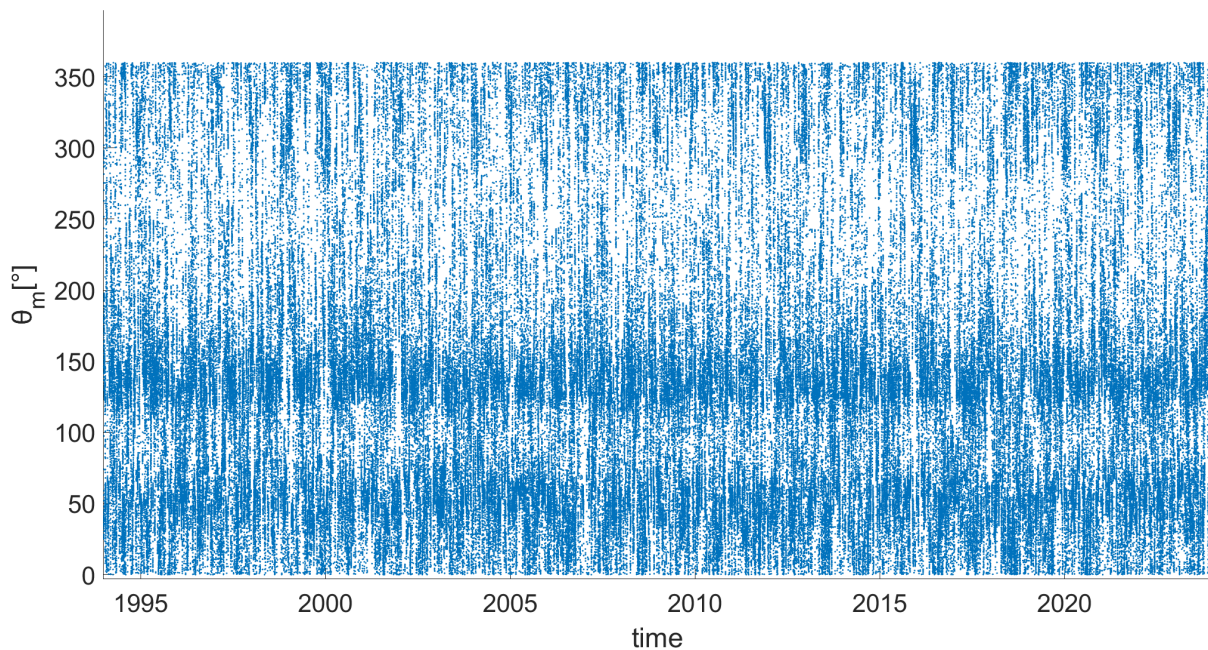
Ako se pogledaju rezultati na slici 10, sa crte trenda primjetan je porast vršnih perioda sa prosjeka od 8 sekundi, na prosjek od preko 8.5 sekundi, što je veći postotak promjene kada se stavi u omjer s porastom značajne valne visine. Rezultati maksimalnih vršnih perioda su također bliži po iznosu, nema velikih oscilacija. Vidljiv je pad vrijednosti vršnih perioda u posljednjih nekoliko godina.

**Tablica 2.** Maksimalni vršni periodi valova za svaku godinu za promatrano razdoblje

Maksimalni godišnji vršni periodi i pripadne značajne valne visine			
	vrijeme	Tp (s)	Hs (m)
1	03/11/2023 07:00	7.843	1.535
2	22/11/2022 19:00	8.560	1.096
3	09/12/2021 08:00	7.702	1.188
4	06/12/2020 18:00	8.353	1.040
5	03/02/2019 08:00	8.582	1.367
6	01/04/2018 08:00	9.341	2.324
7	28/12/2017 04:00	8.337	4.067
8	29/02/2016 06:00	9.023	1.083
9	06/02/2015 05:00	9.227	5.813
10	01/02/2014 13:00	8.290	1.637
11	19/03/2013 17:00	8.646	4.815
12	23/02/2012 22:00	9.308	1.372
13	17/03/2011 10:00	8.298	3.695
14	28/01/2010 02:00	8.558	4.198
15	02/12/2009 11:00	8.315	3.253
16	12/12/2008 02:00	8.384	1.327
17	14/02/2007 07:00	7.421	2.166
18	12/04/2006 14:00	7.602	2.307
19	11/04/2005 07:00	8.867	5.113
20	25/03/2004 01:00	8.323	4.179
21	02/11/2003 22:00	7.613	2.636
22	16/11/2002 18:00	8.477	1.126
23	28/02/2001 23:00	7.840	3.649
24	07/11/2000 00:00	8.418	2.279
25	20/12/1999 16:00	7.932	3.851
26	02/02/1998 09:00	7.725	3.825
27	20/03/1997 14:00	7.604	3.034
28	01/01/1996 18:00	8.219	4.301
29	13/12/1995 20:00	8.461	3.813
30	18/02/1994 19:00	7.782	3.586

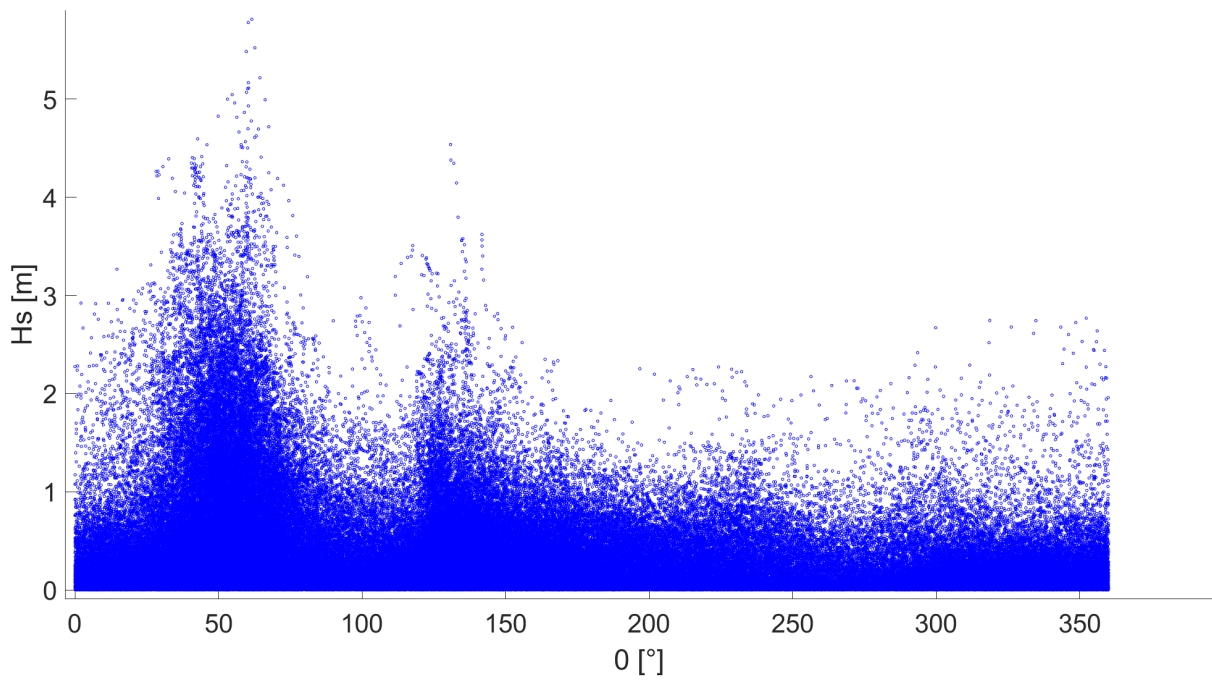
Podaci iz tablice 2 su dobiveni na način da su očitani najveći vršni periodi za svaku godinu, pod uvjetom da je značajna vala visina iznosila minimalno jedan metar. Razlog tome je što su kod valografske plutače podaci izmjereni kod jako malih značajnih valnih visina nedovoljno precizni i nisu nam mjerodavni. Kao i kod značajne valne visine najveće vrijednosti, odnosno ekstremi se pojavljuju u jesenskim i zimskim mjesecima.

Većinom se podaci kreću od 7.5 do 9 sekundi, ali vidljivo je i dalje par ekstrema kao što su 23/02/2012 u 22:00 kada je maksimalni vršni period vala iznosio 9.302 sekundi. Još jedan ekstrem koji se dogodio 01/04/2018 u 08:00 kad je maksimalni vršni period iznosio 9.341 sekundi. Na drugoj strani spektra je također uočljiv jedan ekstrem a on se dogodio 14/02/2007 u 07:00 kada je najveći vršni period iznosio 7.42 što je najmanji maksimalni vršni period u promatranom periodu. Pogledamo li tablicu 2 ne može se zaključiti da veličina vršnih perioda ima korelaciju s veličinom značajne valne visine. U nekim godinama se prate, dok kod nekih godina, kao što je posljednjih 5 analiziranih nije ni približno iznosom jednaka maksimumima.



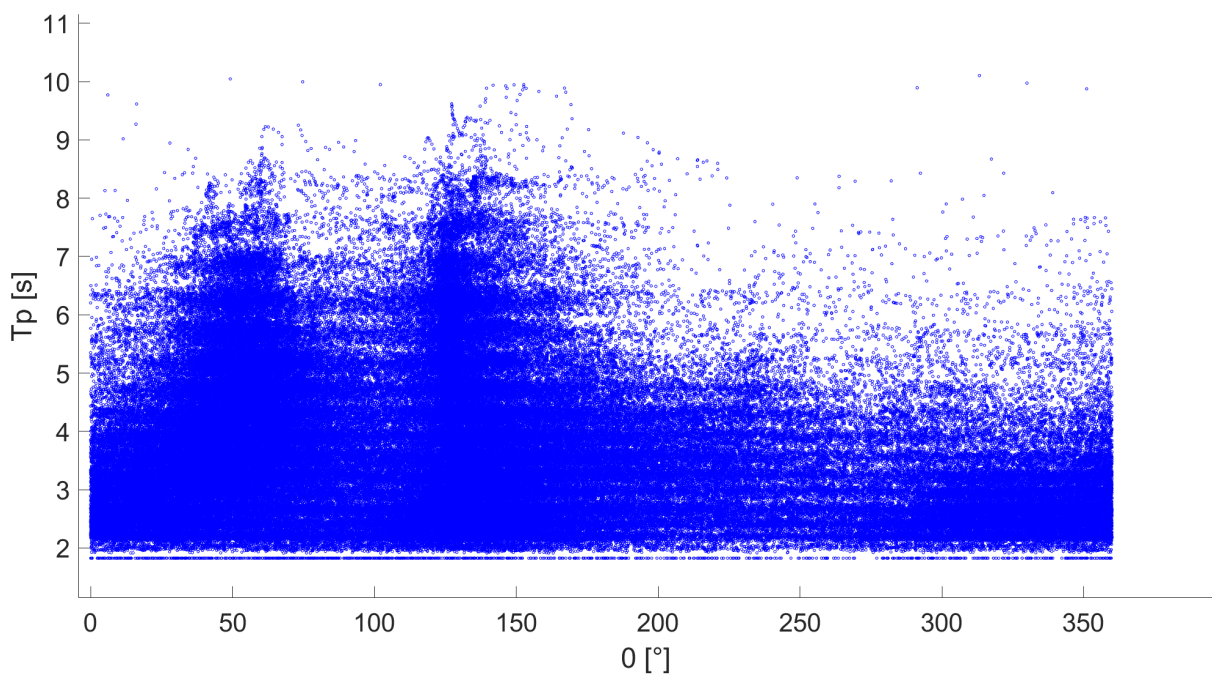
**Slika 11.** Smjer nailaska vala u točki V1 kroz posljednjih 30 godina

Što se tiče smjera nailaska vala sa slike 11.se po gustoći podataka, odnosno zatamnjenjima vidi da je najveći broj valova došao pod kutevima od 30°-70° i 120°-170°. To bi značilo da je promatrano područje većinom pod djelovanjem bure i juga. Na slici 12. se zaključak o dominantnim smjerovima izveden sa slike 11. još bolje uočava.



**Slika 12.** Ovisnost značajne valne visine o smjeru nailaska vala

Iz grafa na slici 12. iz odnosa značajnih valnih visina i smjera nailaska vala da se očitati da najveće značajne valne visine proizlaze od vjetra koji puše pod kutevima od  $30^{\circ}$ -  $70^{\circ}$ , što bi bila posljedica puhanja bure. Osim toga vidljiv je još porast značajne valne visine pod kutom od  $120^{\circ}$ -  $150^{\circ}$ , što bi se klasificiralo kao posljedica djelovanja juga na promatranu točku. Dakle, na točki V1 za značajnu valnu visinu utjecajni vjetrovi su jugo i bura.

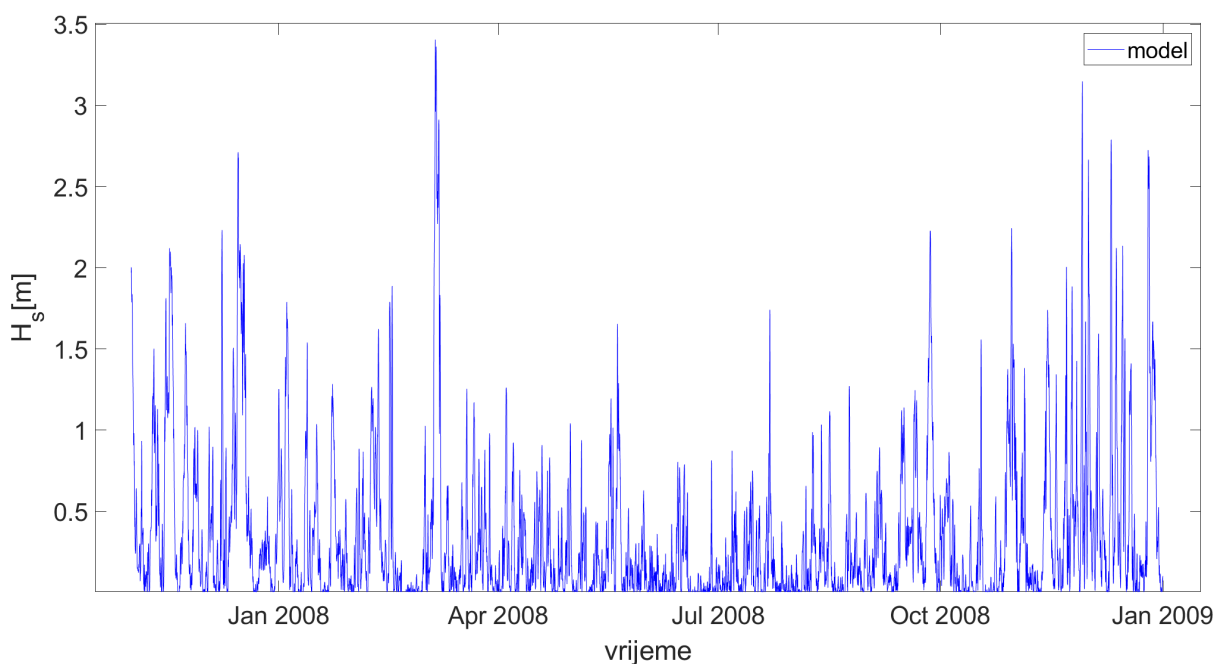


**Slika 13.** Ovisnost vršnih perioda o smjeru nailaska vala

Analizom grafa na slici 13. vidljivo je da kod odnosa vršnog perioda i smjera najska vala nije toliko izražen „peak“ kao kod značajnih valnih visina ali i ovdje najveći vršni periodi proizlaze od vjetra koji puše pod kutovima od  $30^{\circ}$ -  $70^{\circ}$  i  $120^{\circ}$ -  $150^{\circ}$ , što bi kao i kod valnih visina bila posljedica puhanja bure i juga. Dakle, na točki V1 za vršni period utjecajni vjetrovi su jugo i bura.

#### 4.4. MODELIRANI PODACI ZA PERIOD RADA PLUTAČE

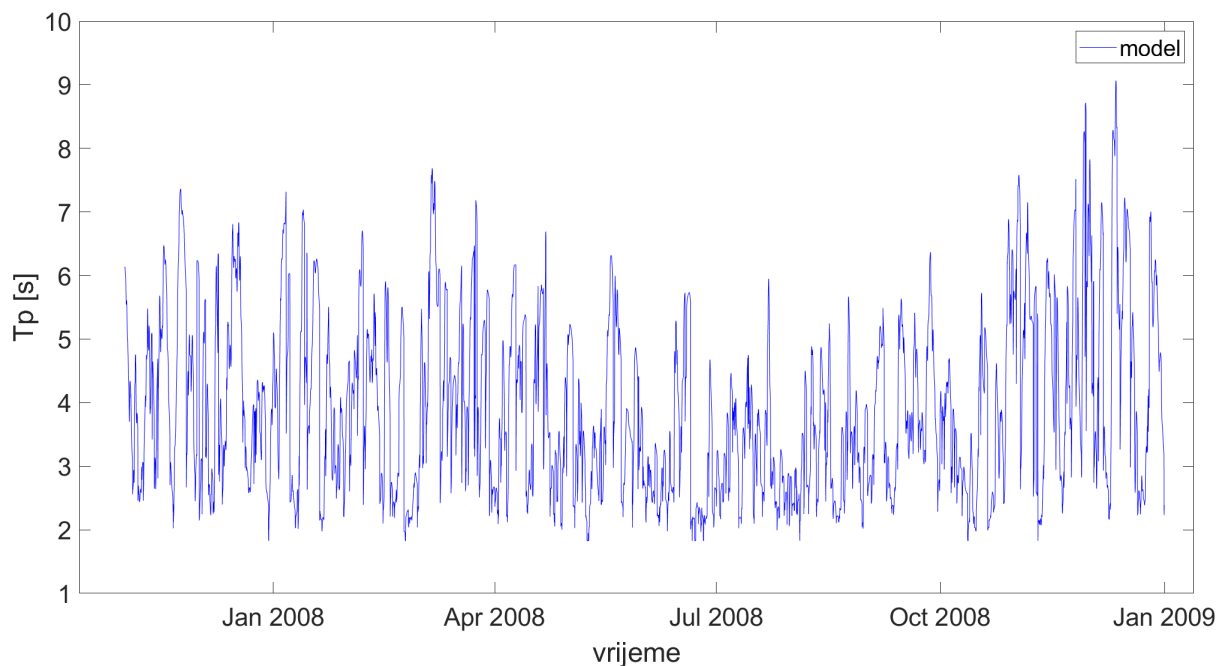
Kada je napravljena analiza za 30-ogodišnji period, fokus pada na razdoblje u kojem su dani podaci s valografske plutače od 01/11/2007 godine do 31/12/2008 godine i u idućem poglavlju ti podaci će biti uspoređivani. Podaci na valografskoj plutači dobiveni su Waverider MKIII modelom koji je detaljnije opisan u poglavlju 2.



**Slika 14.** Značajne valne visine za period od 01/11/2007 do 31/12/2008 (model).

Na grafu za ovaj kraći period su potvrđene tvrdnje od analize tridesetogodišnjeg perioda. Najveće valne visine se pojavljuju u zimskom dobu godine i maksimalne valne visine se kreću oko 3 metra što smo zaključili i u prošlom poglavlju.

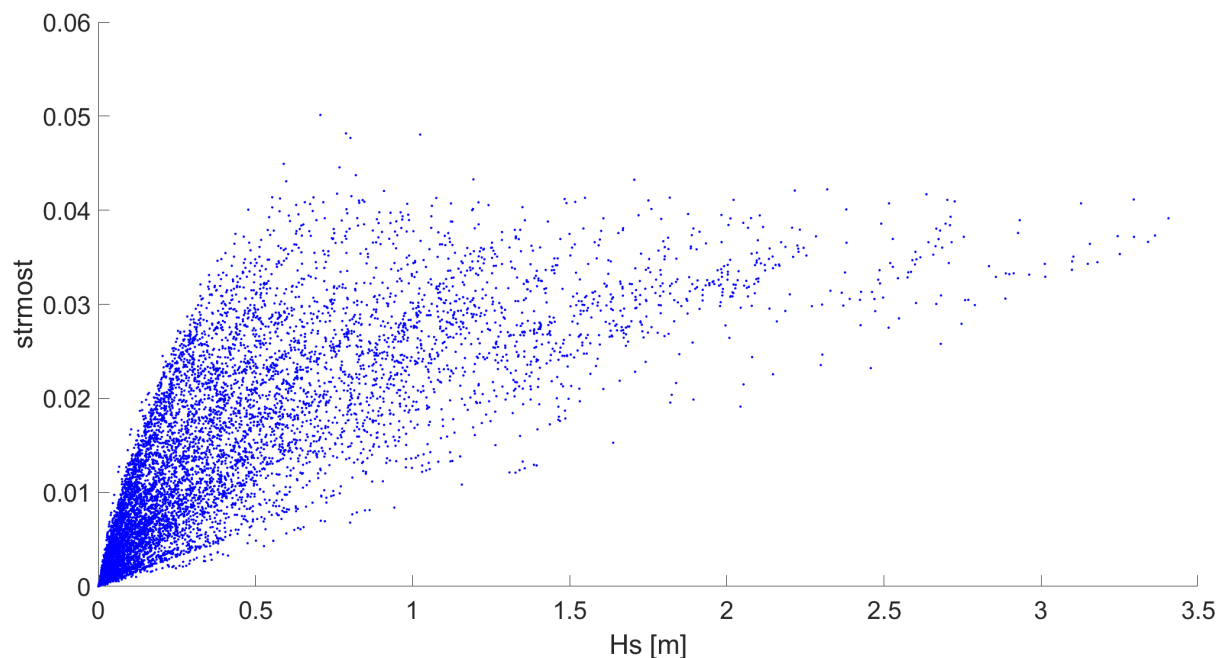




**Slika 15.** Vršni period valova u razdoblju od 01/11/2007 do 31/12/2008 (model).

Vršni periodu također odgovaraju onome što je zaključeno u tridesetogodišnjoj analizi u prošlom poglavlju. Maksimalni vršni periodi nastaju u zimskom dobu godine.

Strmost vala izračunata je po formuli koja je opisana u poglavlju 3.2. Za strmost vala vrijedi pravilo, što je veća značajna valna visina, to je i strmost vala veća.



**Slika 16.** Strmost vala u razdoblju od 01/11/2007 do 31/12/2008 (model).

## 5. ANALIZA ODNOSA VALNIH VISINA I PERIODA

### 5.1. USPOREDBA IZMJERENIH I MODELIRANIH ZNAČAJNIH VALNIH VISINA

Uspoređeni su podaci koje su dobiveni modelom iz ERA5 sustava i oni očitani preko valografske plutače. Kao i prije, uzete su samo one značajne valne visine koje imaju iznos preko 1 m, kako za plutaču tako i za model. Kao glavni dio usporedbe biti će korišten koeficijent determinacije  $R^2$ .

Koeficijent determinacije ( $R^2$ ) je statistički pokazatelj koji mjeri koliko učinkovito regresijski model objašnjava varijacije ovisne varijable u odnosu na neovisne varijable. U analizi podataka,  $R^2$  procjenjuje koliko dobro model odgovara podacima. Vrijednost  $R^2$  varira od 0 do 1, gdje  $R^2 = 0$  označava da model ne objašnjava varijacije u podacima, dok  $R^2 = 1$  ukazuje na savršeno objašnjenje varijabilnosti. U istraživanjima o valovima ili klimatskim promjenama,  $R^2$  je korisno sredstvo za procjenu točnosti modela koji predviđaju promjene u morskoj razini, temperaturi ili valovima. [8]

Formula koeficijenta determinacije glasi:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

U kojoj su:

$y_i$  - stvarne (promatrane) vrijednosti

$\hat{y}_i$  - predviđene vrijednosti iz modela

$\bar{y}$  - srednja vrijednost promatranih podataka

$n$  – broj podataka

Za potrebu analize rezultata uzete su maksimalne značajne valne visine za svaku valnu situaciju, prvo za model, a zatim za plutaču.

**Tablica 3.** Maksimalne značajne valne visine svih valnih situacija izmjerenih na modelu

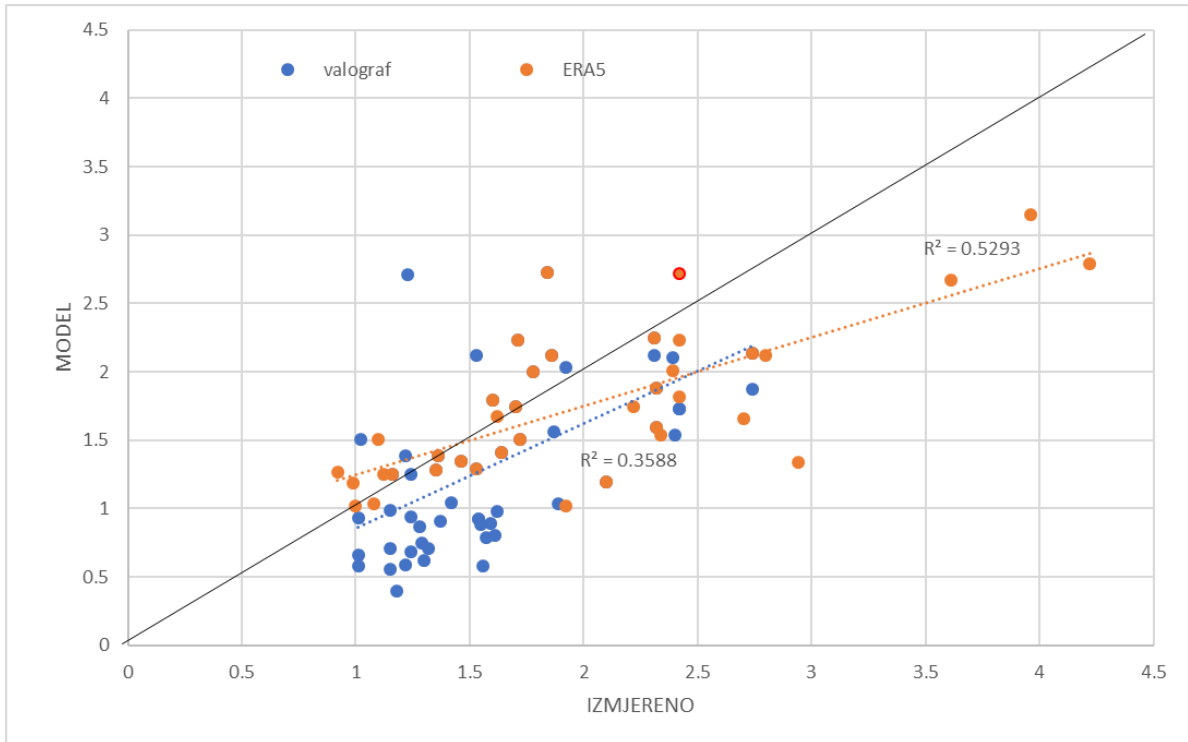
MAKSIMALNE ZNAČAJNE VALNE VISINE ZA ERA5 MODEL			MAKSIMALNE ZNAČAJNE VALNE VISINE IZMJERENE VALOGRAFSKOM PLUTAČOM	
VRIJEME	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)
01/11/2007 01:00	2.00273	6.125832	1.78	5.9
10/11/2007 09:00	1.501891	5.228859	1.72	5.0
15/11/2007 08:00	1.812915	5.596291	2.42	5.0
16/11/2007 21:00	2.120708	6.304298	1.86	5.6
23/11/2007 11:00	1.659085	6.971535	2.70	8.3
27/11/2007 08:00	1.018297	4.649757	1.00	3.6
03/12/2007 06:00	1.020747	4.726418	1.92	5.6
08/12/2007 14:00	2.232281	6.139992	2.42	5.6
13/12/2007 06:00	1.50741	5.177101	1.10	4.8
15/12/2007 05:00	2.711916	6.648293	2.42	5.6
01/01/2008 01:00	1.252852	4.793312	1.12	4.2
04/01/2008 09:00	1.789719	6.193703	1.60	6.3
12/01/2008 20:00	1.540207	6.169289	2.34	7.7
16/01/2008 18:00	1.037597	4.632668	1.08	6.3
23/01/2008 09:00	1.284174	4.725441	1.35	4.6
04/04/2008 05:00	1.262203	4.783058	0.92	4.17
17/05/2008 14:00	1.195584	5.140968	2.10	7.69
20/05/2008 16:00	1.28981	5.37339	1.53	5.26
22/07/2008 08:00	1.742188	5.757668	1.70	5.56
20/09/2008 10:00	1.24622	5.411964	1.16	5
21/09/2008 02:00	1.18428	4.749855	0.99	4.55
26/09/2008 19:00	2.227944	6.333351	1.71	5.26
28/10/2008 17:00	1.339122	6.349953	2.94	8.33
30/10/2008 09:00	2.244246	6.319191	2.31	7.14
04/11/2008 18:00	1.382753	4.980324	1.36	7.69
14/11/2008 08:00	1.740322	5.934914	2.22	7.69
17/11/2008 21:00	1.344043	5.57505	1.46	5
22/11/2008 03:00	2.005012	5.781105	2.39	4.76
24/11/2008 11:00	1.879902	6.051613	2.32	5.56
28/11/2008 16:00	3.148418	7.667824	3.96	5.88
01/12/2008 05:00	2.666431	7.541847	3.61	9.09
05/12/2008 08:00	1.594513	5.751808	2.32	6.67
10/12/2008 15:00	2.789211	7.728371	4.22	10
12/12/2008 18:00	2.121632	6.359718	2.80	10.53
15/12/2008 10:00	2.13563	6.805519	2.74	7.69
18/12/2008 21:00	1.411081	5.276711	1.64	5
25/12/2008 21:00	2.724995	6.52964	1.84	5.88
27/12/2008 20:00	1.669111	5.880714	1.62	5.88

Napravljene su dvije analize za usporedbu značajne valne visine. Prvo su izdvojene maksimalne značajne valne visine, dobivene na modelu za svaku valnu situaciju. Pridodan im je njihov vršni period, te su očitane maksimalna značajna valna visina i vršni period za istu tu valnu situaciju dobivene preko valografa kao što je prikazano u tablici 3.. Na slici 17. narančastom bojom prikazani su podaci kada se valna situacija definira ERA5 modelom. Može se primjetiti da je pri nižim značajnim valnim visinama podudaranje podataka jako dobro, dok je pri većim značajnim valnim visinama (više od 2 metra) veća neravnomjernost podataka i podaci dobiveni modelom su manji nego na valografu. Dobiven je koeficijent determinacije od  $R^2 = 0.5293$  što govori da ima podudarnosti podataka, ali ona nisu zadovoljavajuća.

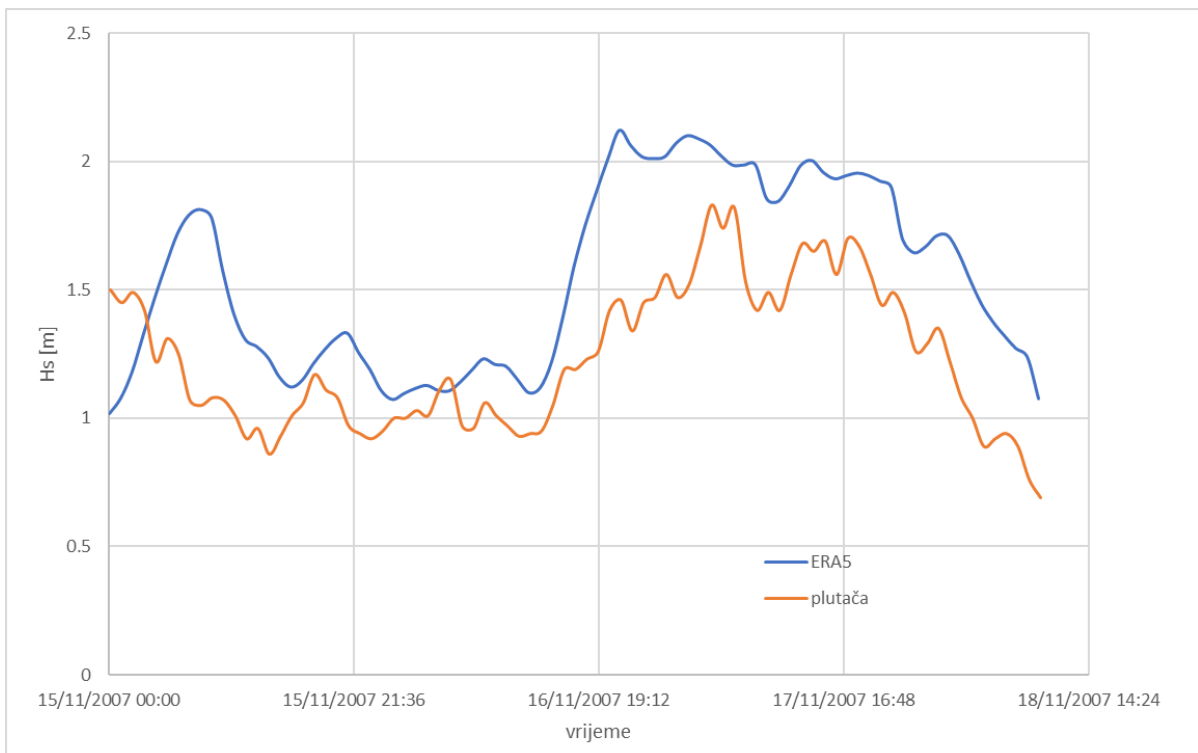
Drugi dio analize predstavlja izdvajanje maksimalnih značajnih valnih visina izmjerenih na plutači za svaku valnu situaciju, i njihov pripadni vršni period, te značajne valne visine određene modelom za valnu situaciju u približno tom vremenu, kao i njihov vršni period. Može se primjetiti da se pojavio veći broj valnih situacija, njih čak 59. Kada se promotri slika 17. i krugovi plave boje, vidljivo je da se pojavljuje veliko raspršenje oko pravca  $y=x$  što ukazuje da model ne daje precizne podatke. Ujedno se vidi da je većina podataka ispod pravca  $y=x$  što ukazuje da model daje manje podatke odnosno procjenjuje manju najveću značajnu valnu visinu unutar valne situacije. To se najviše vidi kod malih značajnih valnih visina (između 1 i 1.5 metara), ali se nastavlja i s ostalim podacima. Izračunati koeficijent determinacije od  $R^2 = 0.3288$  je lošiji nego kod prethodne analize i ne zadovoljava potrebna podudaranja rezultata.

**Tablica 4.** Maksimalne značajne valne visine svih valnih zapisa izmjerenih na plutači

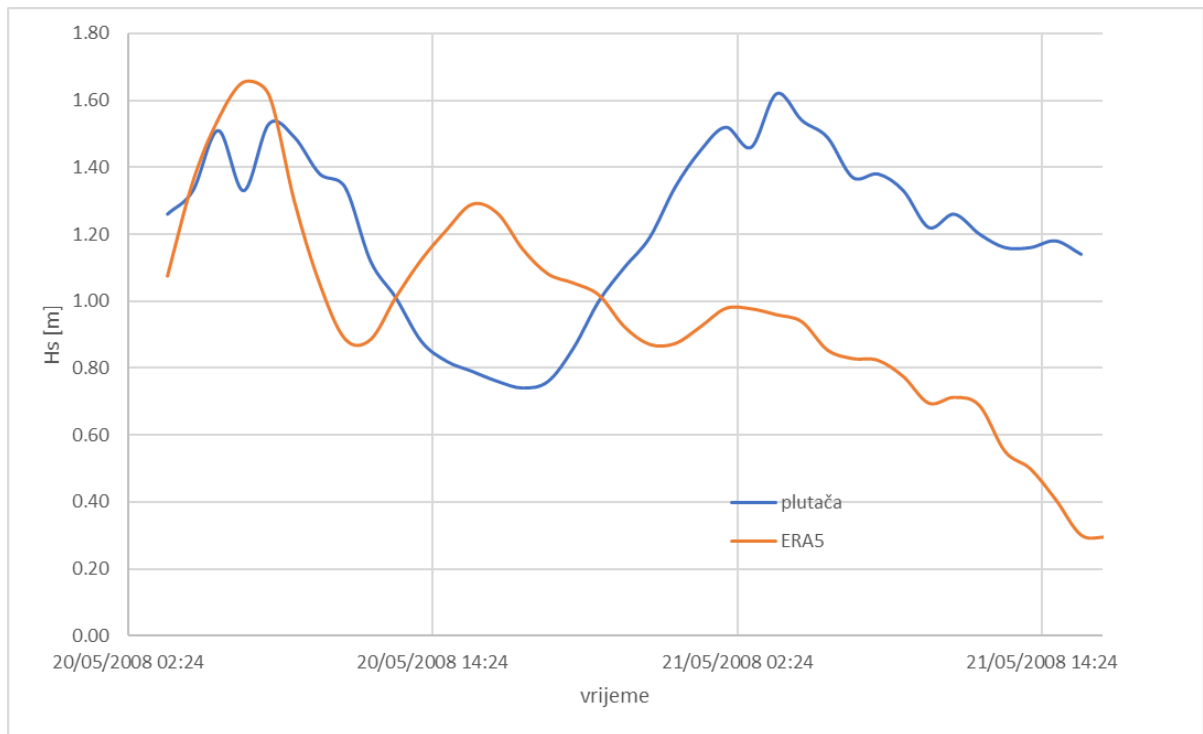
MAKSIMALNE ZNAČAJNE VALNE VISINE IZMJERENE VALOGRAFSKOM PLUTAČOM			MAKSIMALNE ZNAČAJNE VALNE VISINE ZA ERA5 MODEL	
VRIJEME	Hs(m)	Hs(m)	Tp(s)	Tp(s)
01.11.2007 10:38	1.78	2.00273	5.88	6.1351089
05.11.2007 00:08	1.01	0.93123	5	3.7010269
10.11.2007 23:08	1.72	1.50123	5.26	4.7371597
15.11.2007 02:38	1.53	2.120708	4.35	3.8401871
17.11.2007 05:38	1.86	2.120708	6.67	2.6277847
23.11.2007 11:38	2.74	1.873789	8.33	5.1658707
03.12.2007 07:08	1.92	2.028224	5.88	6.0608902
08.12.2007 08:08	2.42	1.724851	5.56	5.7366714
13.12.2007 02:38	1.02	1.50741	4.35	3.8401871
14.12.2007 04:08	1.23	2.7112	5	3.7010269
15.12.2007 00:08	2.42	1.724851	6.25	5.9964371
01.01.2008 01:08	1.16	1.252852	4.17	2.9046402
04.01.2008 09:08	1.6	1.78972	6.25	5.5418472
12.01.2008 19:38	2.4	1.54021	7.14	3.1351089
17.01.2008 09:08	1.89	1.0376	7.69	4.8143082
23.01.2008 14:08	1.35	1.28417	4.55	4.3401871
28.01.2008 12:08	1.01	0.575771	4.76	4.4861832
03.02.2008 03:38	1.55	0.886196	5.88	5.5569839
05.02.2008 03:08	1.28	0.867791	6.25	4.9495621
02.04.2008 16:57	1.56	0.575771	4.55	4.3401871
08.04.2008 14:27	1.54	0.923735	7.69	4.8143082
08.04.2008 14:27	1.54	0.923735	7.69	4.8143082
10.04.2008 21:27	1.15	0.9876	6.67	2.6277847
16.04.2008 23:57	1.15	0.55828	5	3.7010269
19.04.2008 01:57	1.37	0.908599	5.26	4.7371597
21.04.2008 18:27	1.29	0.750754	4.76	4.4861832
29.04.2008 15:57	1.15	0.70706	4.35	3.8401871
30.04.2008 21:57	1.42	1.042275	5.26	4.7371597
05.05.2008 06:27	1.24	0.938522	4.35	3.8401871
18.05.2008 07:27	2.1	1.19558	7.69	4.8143082
20.05.2008 07:57	1.53	1.28981	5.26	4.7371597
21.05.2008 03:57	1.62	0.977992	6.67	2.6277847
14.06.2008 13:27	1.61	0.804632	4.76	4.4861832
17.06.2008 19:27	1.57	0.789159	7.69	4.8143082
08.07.2008 00:27	1.3	0.622347	5	3.7010269
14.07.2008 03:27	1.24	0.682816	5	3.7010269
21.07.2008 00:57	1.22	0.590901	4.55	4.3401871
22.07.2008 00:27	1.7	1.742188	5.56	4.1644058
06.08.2008 07:30	1.01	0.656833	4.76	4.4861832
19.09.2008 21:00	1.24	1.24622	4.35	3.8401871
26.09.2008 14:00	1.71	2.22794	5.26	4.0301285
03.10.2008 21:00	1.32	0.703844	5	3.7010269
17.10.2008 14:30	1.87	1.558784	5.88	3.8719254
30.10.2008 8:00	2.31	2.24425	7.14	3.1351089
03.11.2008 19:00	1.22	1.38275	5.26	3.8167496
05.11.2008 1:30	1.36	1.38275	7.69	4.8143082
06.11.2008 3:30	1.18	0.398345	7.14	3.1351089
13.11.2008 9:00	2.31	2.12163	6.25	2.64048
18.11.2008 0:00	1.46	1.34404	5	3.9954605
21.11.2008 19:00	2.39	2.102707	4.76	4.3377457
24.11.2008 14:00	2.32	1.8799	5.56	4.2229996
26.11.2008 5:30	1.59	0.887206	5	4.1458511
05.12.2008 13:30	2.32	1.59451	6.67	2.6277847
15.12.2008 9:00	2.74	2.1356	7.69	4.8143082
18.12.2008 21:00	1.64	1.41108	5	4.1458511
26.12.2008 11:30	1.84	2.72499	5.88	5.1976089



**Slika 17.** Odnos izmjerenih i modeliranih vrijednosti značajne valne visine



**Slika 18.** Odnos izmjerenih i modeliranih vrijednosti značajne valne visine u razdoblju od 15/11/2007 do 18/11/2007 kada je valna situacija definirana modelom ERA5.

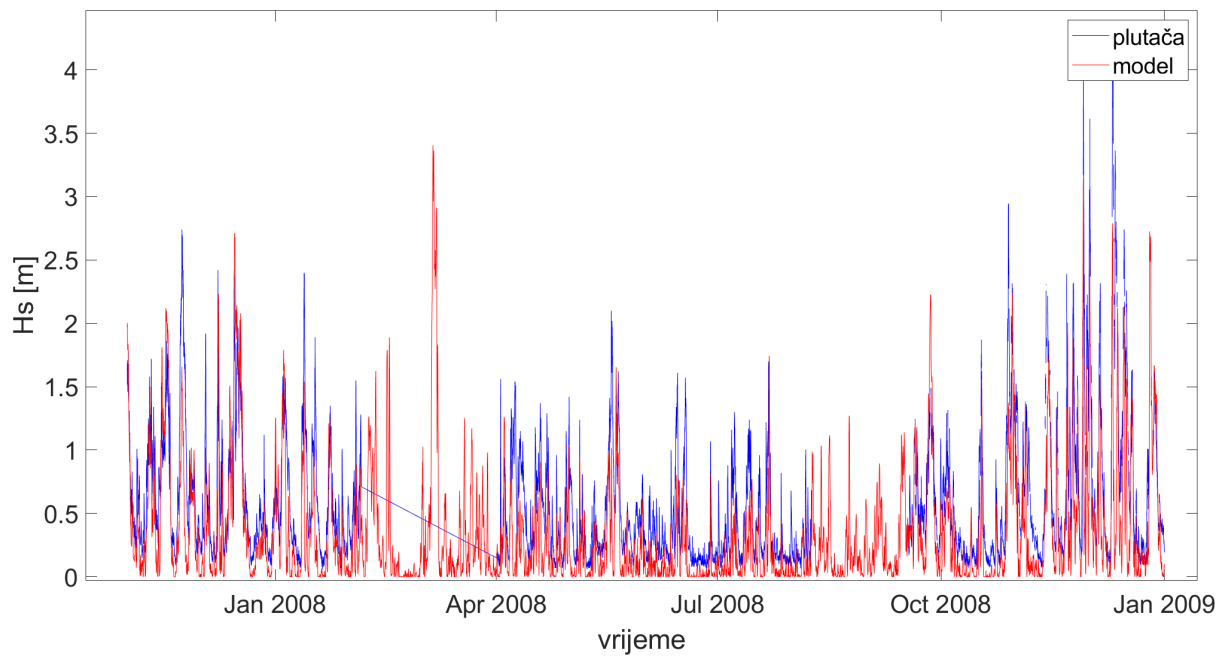


**Slika 19.** Odnos izmjerenih i modeliranih vrijednosti značajne valne visine u razdoblju od 20/05/2008 do 21/05/2008 kada je valna situacija definirana očitajima s plutače.

Na slici 18. i 19. je prikazan jedan valni zapis za slučaj kada je valna situacija definirana modelom ERA5 i dva valna zapisa za slučaj kada je valna situacija definirana očitajima s plutače. Kada se usporede grafovi potvrđuje se ono što je izračunato koeficijentom determinacije, velika su odstupanja plutače i ERA5 modela kada je valna situacija definirana očitajima s plutače, dok su bolji rezultati dobiveni kada je situacija definirana modelom ERA5, ali i dalje ne zadovoljavajući.

Valni zapis je u ovom slučaju definiran početkom u trenutku kada značajna valna visina prijeđe vrijednost jednog metra, te završetkom u onom trenutku kada se značajna valna visina spusti ponovno ispod vrijednosti od jednog metra, a kada nakon toga opet prijeđe vrijednost od jednog metra kreće iduća valna situacija.

Na slici 20. prikazane su maksimalne značajne valne visine modela i one izmjerene na plutači u periodu od 01/11/2007 do 31/12/2008. Linije prate isti uzorak, osim kod ekstremnih pojava, bilo u modelu, bilo na plutači. Vidljivo je da model čak kasni malo u odnosu na izmjerene podatke, jer je uočljivo da crveni ekstremi i skokovi u valnim visinama uvijek nastupaju nakon izmjerenih na plutači.

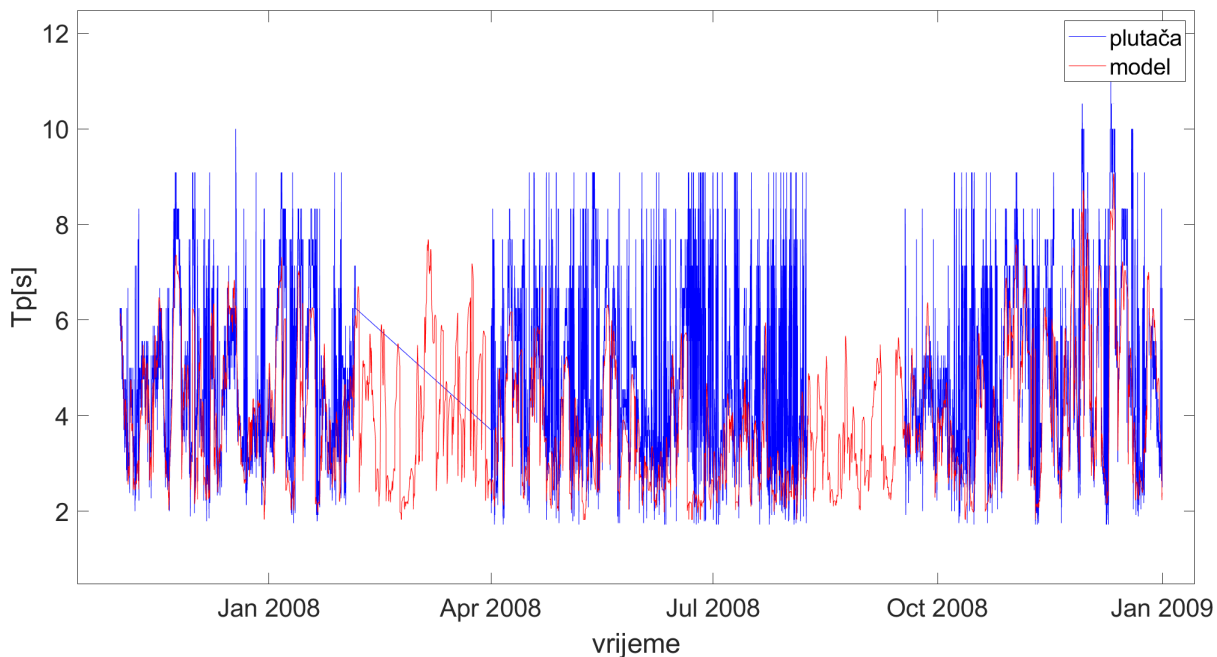


**Slika 20.** Usporedba značajnih valnih visina modela i izmjerenih valnih visina



## 5.2. USPOREDBA IZMJERENIH I MODELIRANIH VRŠNIH PERIODA

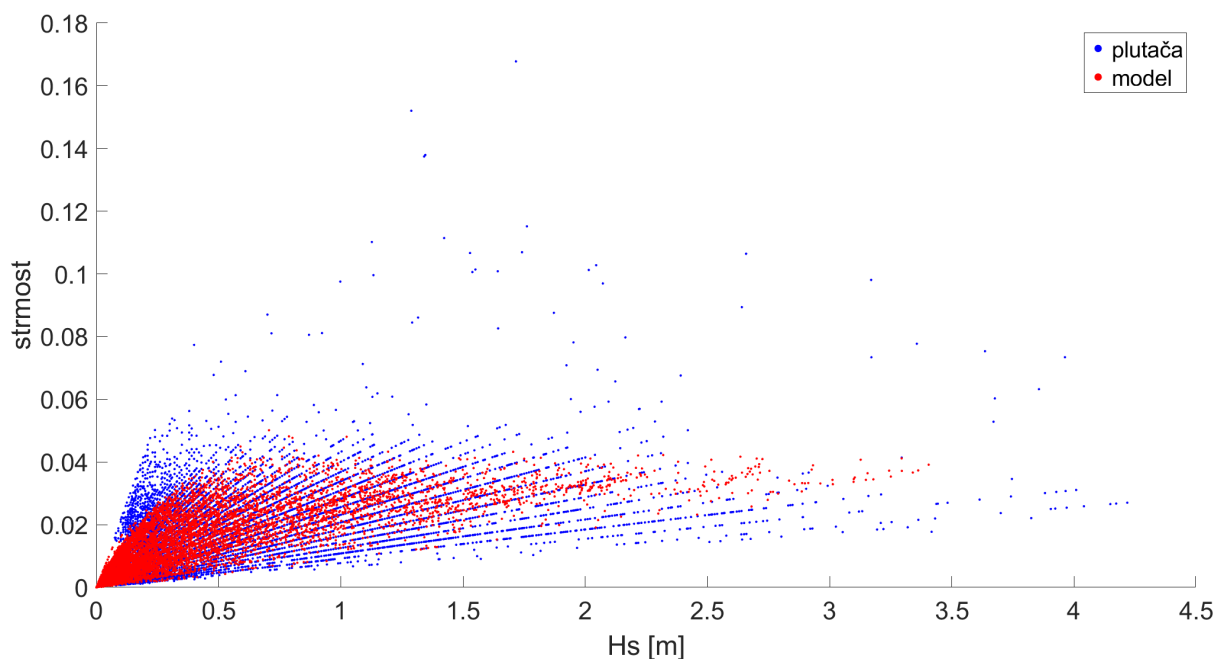
Za sve izdvojene najveće značajne valne visine za postaju V1 očitani su i pripadni vršni periodi  $T_p$ , kako za izmjerene vrijednosti, tako i za modelirane vrijednosti dobivene pomoću ERA5. Vidljivo je da su iznosi podataka na plutači veći, odnosno vršni periodi imaju veće maksimume i veće su oscilacije, ne podudaraju se ni približno s podacima s modela.



**Slika 21.** Usporedba vršnog perioda modela i izmjerenih valnih visina

### 5.3. USPOREDBA MODELIRANIH I IZMJERENIH ODNOSA STRMOSTI I ZNAČAJNE VALNE VISINE

Analiziran je i odnos strmosti vala i značajne valne visine modeliranog sustava i izmjerenog na postaji. Vidljive su razlike najviše kod većih valnih visina, strmost vala na modelu je dvostruko veća. Na primjer se promatraju valovi valnih visina između 2 i 3 metra, vidljivo je da se većina izmjerenih vrijednosti nalazi između 0.01 i 0.04, dok su kod modela između 0.03 i 0.04. Kod manjih valnih visina model daje manje raspršene vrijednosti nego plutača, gdje izmjerena strmost vala i za valove valnih visine ispod 0.5 metara doseže velike vrijednosti strmosti.



**Slika 22.** Usporedba odnosa strmosti valova i značajne valne visine preko modela i preko plutače

## 6. FORMIRANJE UZORKA ZA DUGOROČNU PROGNOZU

Za dugoročnu prognozu vjetrovnih valova ili drugih morskih pojava, važno je pravilno odabrati metodu za formiranje uzorka podataka kako bi se osigurala točnost i pouzdanost prognoza.

### 6.1. METODE ZA FORMIRANJE UZORKA

Postoji niz metoda za formiranje uzorka za dugoročnu prognozu, no ovdje ćemo obraditi samo nekoliko najčešće korištenih. Prva je metoda godišnjih ekstrema, koja se usmjerava na identifikaciju i analizu ekstremnih događaja svake godine, poput najveće zabilježene značajne visine vala. Za svaku godinu odabire se jedan ekstremni podatak, što omogućuje analizu dugoročnih trendova ekstrema. Ova metoda je relativno jednostavna jer se fokusira isključivo na najveće vrijednosti, no njen nedostatak leži upravo u toj jednostavnosti, jer zanemaruje ostale značajne, ali manje ekstremne događaje unutar godine.

Druga metoda je metoda prekoračenja praga, koja uključuje odabir svih događaja koji premašuju određeni prag. Time se omogućuje analiza većeg broja ekstremnih događaja, za razliku od metode godišnjih ekstrema. Prednost ove metode je što bolje iskorištava dostupne podatke jer uključuje sve relevantne ekstreme iznad praga, no pažljiv odabir praga ključan je za izbjegavanje prevelikog ili premalog broja podataka.

Još jedna važna metoda je analiza vremenskih nizova, u kojoj se vremenski nizovi povijesnih podataka koriste za identifikaciju obrazaca, trendova i sezonalnosti. Na temelju tih obrazaca vrši se prognoza budućih uvjeta. Ova metoda je korisna jer otkriva sezonske i cikličke promjene u podacima, ali može biti zahtjevna za implementaciju i oslanja se na duljinu i kvalitetu dostupnih podataka.

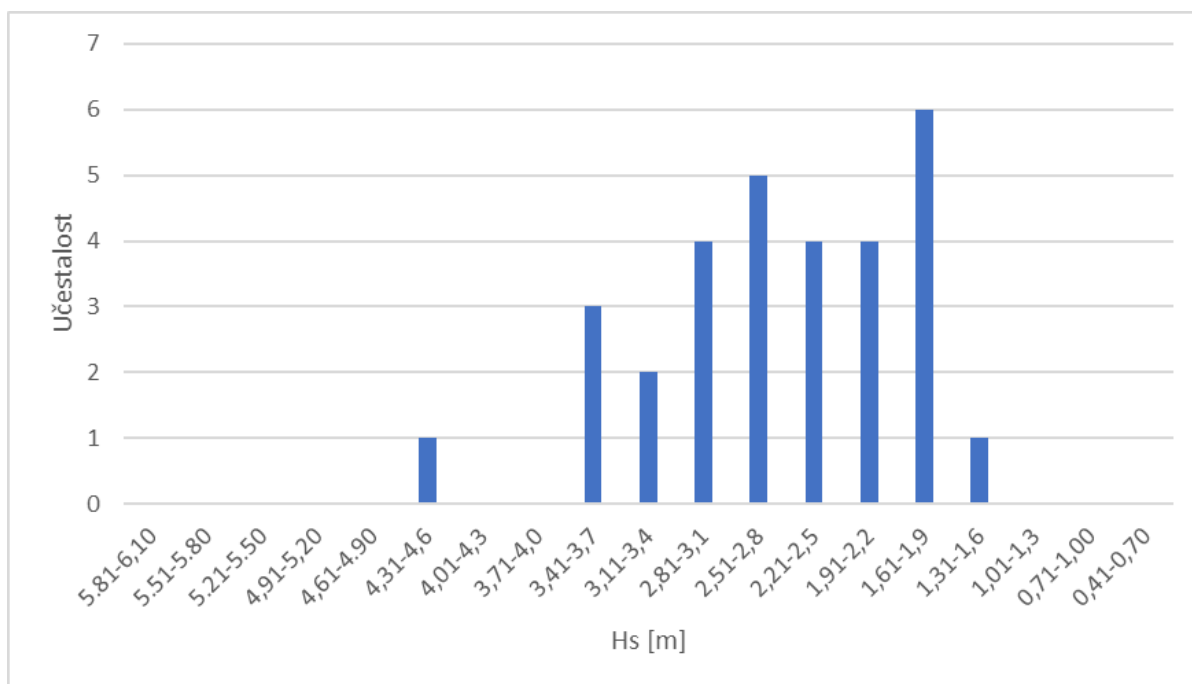
Svaka od ovih metoda ima svoje prednosti i ograničenja, a izbor odgovarajuće metode ovisi o dostupnosti podataka, specifičnim potrebama analize i željenoj razini preciznosti prognoza. U ovom radu odabrana je metoda godišnjih ekstrema jer se raspoložuje idealnim skupom podataka od 30 godina, što je optimalno za ovu metodu, a ona je i jednostavna za primjenu i analizu.

## 6.2. METODA GODIŠNJIH EKSTREMA

Kako su podaci dobiveni djelovanjem vjetrova svih mogućih smjerova od kojih je najdominantnija bila bura, odabrano je da bi najbolje za analizu i model bilo gledanje dugoročne analize jednog od dominantnijih smjerova koji je najbitniji za potencijalnu izgradnju pomorskih građevina, a to bi bio smjer jugo. Iz podataka dobivenih modelom izdvojene su sve valne visine koje su se dogodile kao posljedica vjetra smjera od 120 stupnjeva do 150 stupnjeva, te su traženi godišnji maksimumi za svih trideset godina. Dobiveni su većinom slični rezultati maksimuma svake godine, ali treba izdvojiti 2018. godinu kada je valna visina djelovanjem juga dosegla 4.54 metra.

**Tablica 5.** Maksimalne značajne valne visine za pojedine valne situacije iz smjera jugo 120°-150° po godinama od 1993. do 2003.

<b>Maksimumi iz smjera jugo po godinama</b>		
	<b>vrijeme</b>	<b>Hs(m)</b>
1	30/10/2023 15:00	1.6117
2	22/11/2022 08:00	2.8056
3	08/12/2021 17:00	2.6164
4	05/12/2020 17:00	2.8299
5	04/04/2019 20:00	2.6669
6	29/10/2018 17:00	4.5377
7	05/11/2017 18:00	2.4339
8	05/03/2016 18:00	2.1126
9	25/03/2015 19:00	1.5461
10	31/01/2014 04:00	3.0339
11	11/02/2013 18:00	3.5786
12	31/10/2012 21:00	3.4064
13	16/03/2011 08:00	2.3547
14	19/02/2010 14:00	2.7523
15	27/04/2009 21:00	3.3839
16	28/11/2008 16:00	3.1484
17	26/09/2007 06:00	1.6997
18	15/09/2006 06:00	2.1224
19	03/12/2005 06:00	2.0565
20	31/10/2004 08:00	2.2828
21	01/11/2003 05:00	1.8229
22	16/11/2002 13:00	2.7761
23	28/02/2001 09:00	2.3848
24	06/11/2000 20:00	3.6215
25	21/10/1999 14:00	2.5289
26	07/10/1998 05:00	1.8429
27	01/06/1997 23:00	1.9937
28	06/01/1996 10:00	1.6264
29	19/01/1995 06:00	1.7040
30	06/11/1994 11:00	2.8689



**Slika 23.** Učestalost pojavljivanja određenog razreda značajnih valnih visina

Maksimalne značajne valne visine su podijeljene na periode od po 0.3 metra, i dobiveno je devet različitih intervala u kojima su poznati podaci za značajne valne visine, koje će se koristiti u idućem poglavlju. Intervali su određeni proizvoljno, po zadanim i dobivenim podacima u ovoj analizi zaključeno je da je 0.3 optimalan razmak intervala za ujednačen broj podataka po intervalu. Odabir metode koja će se koristiti za dugoročnu prognozu je jako bitna jer ne daju sve metode jednake rezultate te nisu sve primjenjive za sve vrste rezultata. Pouzdanije bi bilo imati više različitih metoda pa po usporedbi rezultata odrediti realnije podatke, ali fokus u ovom radu će biti samo na ovu jednu.

## 7. DUGOROČNA PROGNOZA

Najprije se iz uzorka ustanovi empirijska raspodjela vjerojatnosti. Za to je potrebno uzorak poredati po opadanju i proračunati empirijsku vjerojatnosti premašenja po jednoj od kompromisnih formula, korištena je Hazenova formula:

$$P(H_s > H_{s,i}) = (2F_i - 1) / 2n$$

Pri tome je:

$H_s$  - slučajna varijabla značajne valne visine

$H_{s,i}$  - i-ta vrijednost slučajne varijable značajne valne visine  $H_s$  u uzorku složenom po opadanju

$n$  - opseg uzorka; tj. broj podataka (vrijednosti  $H_{s,i}$ )

$i=1.....n$  - redni broj razmatrane vrijednosti  $H_{s,i}$  složenom po opadanju

$f_i$  - apsolutna učestalost i-te vrijednosti; tj. broj ponavljanja značajnih valnih visina  $H_{s,i}$

$F_i = \sum_{j=1}^i f_j$  - kumulativna apsolutna učestalost i-te vrijednosti; tj. broj značajnih valnih visina  $H_{s,i}$  koje dostižu ili premašuju vrijednost  $H_{s,i}$

$P(H_s > H_{s,i}) = P(H_{s,i})$  - vjerojatnost premašenja i-te vrijednosti  $H_{s,i}$  [2]

**Tablica 6.** Dugoročna analiza- vjerojatnost premašenja za točku V1 iz dostupnih podataka o značajnoj valnoj visini numeričkog modela ERA5 od 1993. do 2023.

Razred	Razred valnih visina	Srednja značajna valna visina	Apsolutna učestalost	Kumulativna apsolutna učestalost	Vjerojatnost premašenja	ln $H_{s,i}$	$u_i$
	g $H_s$ - d $H_s$	$H_{s,i}$	$f_i$	$F_i$	$P(H_s > H_{s,i}) = (2F_i - 1) / 2n$		
	[m]	[m]	[1]	[1]	[1]		
1	4,31-4,6	4.455	1.00	1	0.0166667	1.49403	2.12805
2	3,41-3,7	3.505	3.00	4	0.1166667	1.25419	1.19182
3	3,11-3,40	3.255	2.00	6	0.1833333	1.18019	0.90273
4	2,81-3,10	2.955	4.00	10	0.3166667	1.08350	0.47704
5	2,51-2,80	2.655	5.00	15	0.4833333	0.97644	0.04179
6	2,21-2,5	2.355	4.00	19	0.6166667	0.85654	-0.29674
7	1,91-2,2	2.055	4.00	23	0.7500000	0.72028	-0.67449
8	1,61-1,9	1.755	6.00	29	0.9500000	0.56247	-1.64485
9	1,31-1,6	1.455	1.00	30	0.9833333	0.37501	-2.12805

Nakon izračuna empirijske vjerojatnosti premašenja, parovi  $[H_{s,i}; P(H_s > H_{s,i})]$  se postavljaju u koordinatni sustav  $(H_s; P(H_s > H_s))$  čime se dobiva empirijska raspodjela vjerojatnosti slučajne varijable značajne valne visine u obliku niza točaka. Na apscisi su prikazane vrijednosti značajne valne visine  $(H_{s,i})$ , dok su na ordinati prikazane vjerojatnosti premašenja  $P(H_s > H_{s,i})$ . Prilagodбом krivulje  $[H_{s,i}; P(H_s > H_{s,i})]$  skupu tih točaka u koordinatnom sustavu dobiva se teorijska funkcija raspodjele vjerojatnosti  $P(H_s > H_{s,i}) \equiv P(H_s)$ . Ova funkcija omogućava određivanje vjerojatnosti dostizanja ili premašenja bilo koje vrijednosti  $H_{s,i}$ , uključujući i one rijetke koje nikada nisu zabilježene, kroz grafičku ekstrapolaciju izvan područja izmjerenih vrijednosti. Međutim, ekstrapolacija je nepouzdana jer prilagodba krivulje skupu točaka nije jednoznačna. Na istom skupu točaka se može prilagoditi više različitih tipova krivulja, koje će dati različite rezultate ekstrapolacijom izvan područja podataka. [2]

Problem se rješava logaritmiranjem osi apscise ( $\ln H_s$ ), pri čemu se funkcija raspodjele vjerojatnosti transformira u pravac. Na taj način, empirijska funkcija raspodjele vjerojatnosti, odnosno skup parova  $[H_{s,i}; P(H_s > H_{s,i})]$  se prilagođava u pravac, što omogućuje jednoznačno određivanje teorijske funkcije raspodjele vjerojatnosti. Kada je poznata linearna funkcija raspodjele vjerojatnosti  $P(H_s > H_{s,i}) \equiv P(H_s)$ , povratno razdoblje bilo koje vrijednosti slučajne varijable značajne valne visine može se odrediti pomoću odgovarajućeg izraza:

$$PR [\text{god}] = \frac{T_{REG}}{n} * \frac{1}{P(H_s > H_{s,i})}$$

U kojem 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. [2]

U ovom slučaju, jer je korištena metoda godišnjih ekstrema za razdoblje od 30 godina,  $T_{REG}$  će biti jednak iznosu  $n$ . Svrha dugoročne prognoze je da se dobije značajna valna visina određenog povratnog perioda  $H_s^{PR}$ .

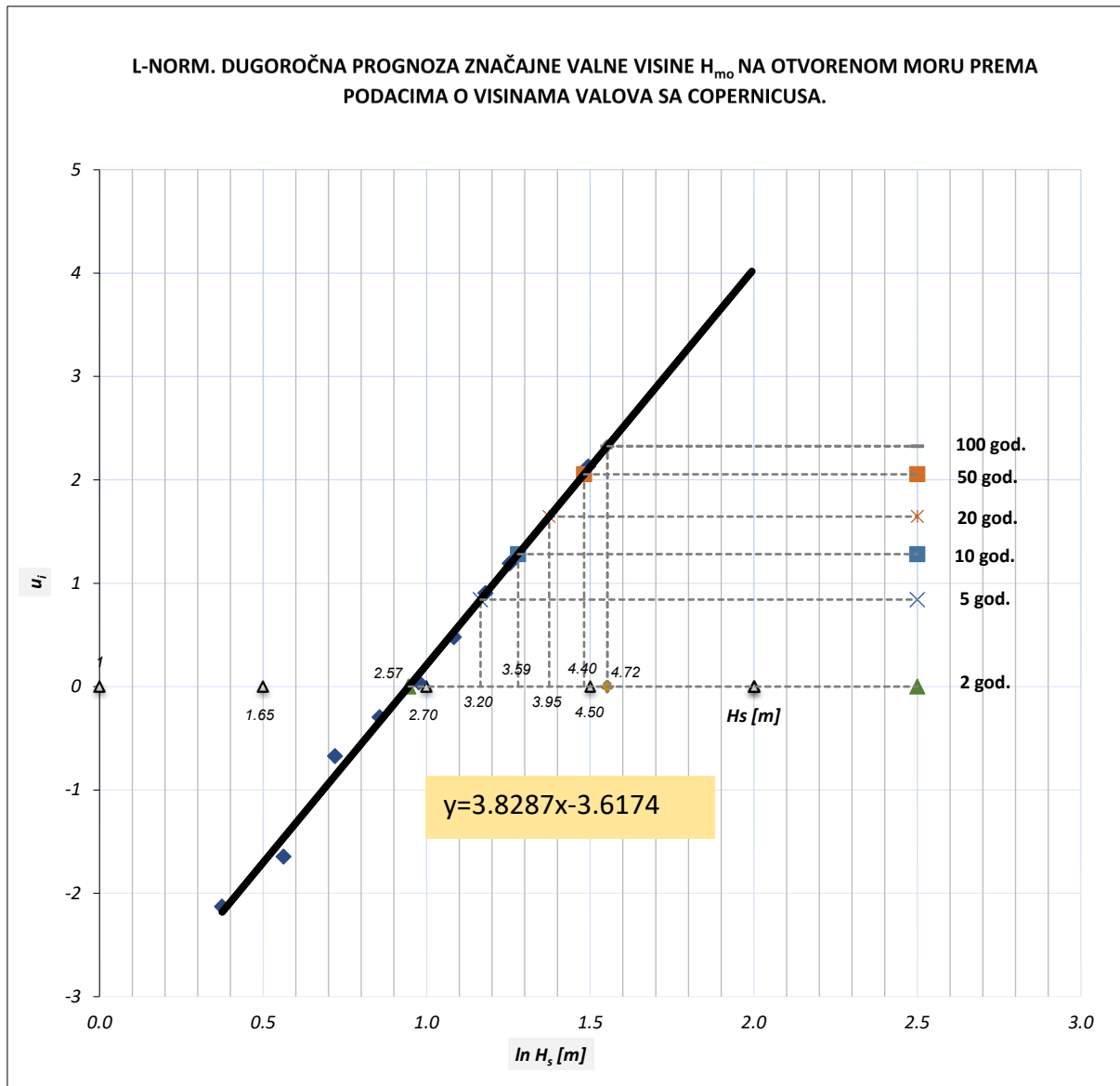
$$P(H_s > H_s^{PR}) = \frac{T_{REG}}{n} * \frac{1}{PR}$$

$H_s^{PR}$  [m] je značajna valna visina povratnog razdoblja od PR godina koja se odredi na grafu teorijske funkcije raspodjele vjerojatnosti za vjerojatnost  $P(H_s > H_s^{PR})$ . [2]

Kada se dobiju logaritmirane značajne valne visine  $\ln H_s$  i vjerojatnosti premašenja valne visine  $P(H_s > H_{s,i})$ , kao skup parova  $[\ln H_s, P(H_s > H_{s,i})]$ , nastaje problem jer ordinatna skala nije linearna nego se treba kalibrirati intergriranjem Gauss-ove funkcije gustoće vjerojatnosti. Uvodi se slučajna varijabla „U“ sa svojim vrijednostima „u“. „u“ varijabla ima normalnu raspodjelu vjerojatnosti normiranog oblika  $N[0,1]$ . Ako se linearne vrijednosti „u<sub>i</sub>“ nacrtaju na linearnoj



ordinatnoj skali njima se mogu pridružiti nelinearne vrijednosti  $P(H_s > H_{s,i})$ . To je u excelu jednostavno dobiveno naredbom NORMSINV koja je primjenjena na sve vrijednosti premašenja valne visine za prethodno izračunate razrede učestalosti. Kada su dobiveni parovi  $u_i$  i  $\ln H_s$  točke se mogu spojiti i nacrtati linearni pravac (slika 23.) koji služi za dobivanje ostalih značajnih valnih visina pripadnih povratnih perioda. [2]



**Slika 24.** Dugoročna prognoza značajne valne visine na otvorenom moru

Na ordinati se mogu vidjeti iznosi slučajne varijable  $u_i$  kao i vrijednosti premašivanja  $P(H_s > H_{s,i})$ , dok su na apscisi također dva različita sustava, jedan pravac prikazuje značajnu valnu visinu, a drugi logaritamsku vrijednost te iste značajne valne visine. Uvrštavanjem para točaka  $u_i$  i  $\ln H_s$  dobiva se crta trenda, odnosno pravac koji predviđa buduće predviđene vrijednosti i

ponašanje značajne valne visine. Te je zatim izračunata slučajna varijabla  $u_i$  za određena povratna razdoblja kao što je prikazano u tablici 7.

**Tablica 7.** Vrijednosti značajne valne visine za određena povratna razdoblja

PR [god]	$P(H_s^* \geq H_s)$	$u_i$	$\ln H_{si}$ [m] (prognozirano)	$H_{si}$ [m] (prognozirano)
100	0.0100	2.326348	1.5524	4.72
50	0.0200	2.053749	1.4812	4.40
20	0.0500	1.644854	1.3744	3.95
10	0.1000	1.281552	1.2795	3.59
5	0.2000	0.841621	1.1646	3.20
2	0.5000	0.000000	0.9448	2.57

Kalibriranje pomoćne ordinate napravljeno je u Tablici 7. za svako povratno razdoblje određena je pripadna vrijednost premašenja, te iz toga izračunata vrijednost slučajne varijable „ $u_i$ “. Zatim se pomoću tih točaka i već konstruiranog pravca pravca dobiju značajne valne visine za te povratne periode. Podudaranje grafičkog izračuna i numeričkog je idealno.

Za numeričko izračunavanje potrebna je bila jednadžba pravca i iznos slučajne varijable  $u_i$  preko kojeg se onda dobio logaritam značajne valne visine, te se na kraju pretvorio u konačan iznos značajne valne visine.

## 8. ZAKLJUČAK

Analiza i praćenje valova predstavljaju vrlo složen i dugotrajan proces, ali su od velike važnosti jer valovi svojim djelovanjem otežavaju izgradnju i pravilno korištenje pomorskih građevina. Najvažniji parametri za vjetrovne valove su značajna valna visina, vršni period vala te smjer nailaska vala. Zadatak ovog istraživanja bio je usporediti i provjeriti točnost modela ERA5 u odnosu na izmjerene podatke plutače, kako bi se procijenilo koliko dobro model predviđa ključne karakteristike vala. Također je provedena analiza podataka modela ERA5 za razdoblje od 30 godina, s ciljem proučavanja mogućih promjena i ekstremnih događaja. Skup podataka s plutače prikupljen je u razdoblju od 01/11/2007 do 31/12/2008, a isti vremenski period korišten je i za analizu modela. U analizi su korišteni programi Excel i Matlab, pomoću kojih su obrađeni podaci dobiveni iz valografske plutače i modela ERA5. Nažalost, podaci o smjeru nailaska vala nisu bili dostupni s plutače, pa taj aspekt nije mogao biti pravilno obrađen i analiziran.

Koeficijentom determinacije utvrđeno je koliko dobro numerički model opisuje pojavu najvećih značajnih valnih visina u valnim situacijama. Kada su uspoređene maksimalne značajne valne visine dobivene iz svakog valnog zapisa određenog modela sa pripadnim maksimalnim značajnim valnim visinama očitanim s valografa dobiven je koeficijent determinacije koji je iznosio  $R^2 = 0.5293$ , što znači da podaci imaju solidnu, ali ne dovoljno dobru podudarnost. Kada se analizirala obrnuta situacija, odnosno kada su uzete prvo maksimalne značajne valne visine izmjerene na valografu za svaku valnu situaciju, pa pripadne maksimalne značajne valne visine modela za valnu situaciju, koeficijent determinacije je iznosio  $R^2 = 0.3588$ , što također nije zadovoljavajuće.

Što se tiče analize modela za period od 30 godina, podaci su se pokazali konzistentnima. Izdvojeno je 30 valnih situacija s najvećim značajnim valnim visinama, po jedna za svaku godinu, i utvrđeno je da se te visine uglavnom kreću u intervalu od 3 do 4,5 metra, uz nekoliko anomalija. Sve maksimalne vrijednosti zabilježene su tijekom zimskih mjeseci ili kasne jeseni. Vršni period također prati sličan trend, svake godine se kreće u rasponu od 7.5 do 9 sekundi, osim u par ekstremnih situacija. Analizom smjera nailaska valova zaključeno je da je lokacija pod dominantnim utjecajem bure i juga.

Također je analiziran odnos između značajnih visina vala i smjera nailaska, kao i vršnog perioda i smjera nailaska, te je zaključeno da valovi s najvećim značajnim valnim visinama nastaju pod utjecajem vjetra pod kutem od  $30^\circ$ - $60^\circ$  i  $120^\circ$ - $150^\circ$ , što potvrđuje da su primarni vjetrovi jugo i bura. Vršni period nije pokazao tako izražen utjecaj smjera, ali su ipak veće vrijednosti zabilježene u smjerovima bure i juga.

Analizom strmosti valova i njihovog odnosa prema značajnoj valnoj visini utvrđeno je da se strmost vala povećava s povećanjem valne visine, premda je u izmjerenim podacima taj efekt bio izraženiji kod manjih valova. Za valove s visinama iznad 1,5 metara, strmost vala kretala se između 0,01 i 0,04, a za valove iznad 2,5 metara između 0,03 i 0,04.

U dugoročnoj prognozi valova, fokus je bio na jugo jer miješanje smjerova nije davalo pouzdane podatke. Analizom su dobiveni rezultati za značajne valne visine s povratnim razdobljima od 2 do 100 godina. Značajna visina s povratnim razdobljem od dvije godine je iznosila 2.57m, s povratnim razdobljem od 5 godina je iznosila 3.20m, s povratnim razdobljem od 10 godina 3.59m, s povratnim razdobljem od 20 godina 3.95m, s povratnim razdobljem od 50 godina 4.40m, te finalno s povratnim razdobljem od 100 godina 4.72m.

Ovi rezultati mogu biti korisni u planiranju izgradnje pomorskih građevina na obali Istre. Utvrđeno je da valovi uzrokovani jugom imaju manji utjecaj nego oni uzrokovani burom, gdje su zabilježene veće značajne valne visine.

Zaključno, numerički model nije konzistentan, ponekad se vrlo dobro slaže s izmjerenim podacima, dok u drugim slučajevima značajno odstupa. Vrijeme je nepredvidivo i podložno stalnim promjenama, što ukazuje na to da točnost modela valova uvelike ovisi o preciznosti meteorološkog modela koji osigurava ulazne podatke. Pouzdanost rezultata za značajne valne visine, vršne periode i smjerove u velikoj mjeri zavisi od točnosti podataka o brzini vjetra.

## 9. LITERATURA

[1] Matlab overview

[https://uk.mathworks.com/products/matlab.html?s\\_tid=hp\\_ff\\_p\\_matlab](https://uk.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_ff_p_matlab) (Pristupljeno 01-09-2024 )

[2] M.Pršić, D.Carević (2023.), POMORSKE GRAĐEVINE, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

[3] Statistical description of wave parameters,

[https://www.coastalwiki.org/wiki/Statistical\\_description\\_of\\_wave\\_parameters](https://www.coastalwiki.org/wiki/Statistical_description_of_wave_parameters)  
(Pristupljeno 03-09-2024)

[4] Directional Waverider MkIII,

<https://www.yumpu.com/en/document/view/52976818/directional-waverider-mkiii>  
(pristupljeno 10-09-2024)

[5] What is Wave Steepness? <https://weathermuffin.com/what-is-wave-steepness/>  
(Pristupljeno 05-09-2024)

[6] Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), URL: [10.24381/cds.adbb2d47](https://cds.clm.copernicus.org/cdsapp#!/era5/hourly) (Pristupljeno 10-09-2024)

[7] Lončar G., Ocvirk E., Andročec V. (2010.), Usporedba modeliranih i mjerenih površinskih vjetrenih valova, *Građevinar*, Vol 62, No. 3, pp. 197-206

[8] Coefficient of Determination ( $R^2$ ) | Calculation & Interpretation

<https://www.scribbr.com/statistics/coefficient-of-determination/> (Pristupljeno 08-09-2024)

[9] Ruža vjetrova <http://www.dn-nautica.com/jedrenje-u-hrvatskoj/savjeti/vjetrovi-na-jadraniu>  
(Pristupljeno 07-09-2024)

[10] Wind waves and swell <https://www.britannica.com/science/wave-water#ref1120188>  
(pristupljeno 16-09-2024)

## 10. PRILOZI

VALOGRAF	V1			s	Lp	strmost_vala
	vrijeme	Hs	Hmax			
01/11/2007 00:08	1.64	3.03	6.3	37.2	61.0	0.0269
01/11/2007 00:38	1.63	2.66	6.3	37.4	61.0	0.0267
01/11/2007 01:08	1.68	2.70	5.9	32.1	54.0	0.0311
01/11/2007 01:38	1.52	2.70	5.9	35.5	54.0	0.0282
01/11/2007 02:08	1.65	3.01	6.3	36.9	61.0	0.0271
01/11/2007 02:38	1.71	3.19	6.3	35.6	61.0	0.0280
01/11/2007 03:08	1.58	3.19	5.9	34.1	54.0	0.0293
01/11/2007 03:38	1.57	2.65	6.3	38.8	61.0	0.0257
01/11/2007 04:08	1.51	2.87	5.9	35.7	54.0	0.0280
01/11/2007 04:38	1.57	3.17	5.9	34.4	54.0	0.0291
01/11/2007 05:08	1.57	2.68	6.3	38.8	61.0	0.0257
01/11/2007 05:38	1.46	2.23	5.9	36.9	54.0	0.0270
01/11/2007 06:08	1.48	2.77	5.9	36.4	54.0	0.0274
01/11/2007 06:38	1.55	2.44	5.6	31.1	48.3	0.0321
01/11/2007 07:08	1.52	2.37	5.6	31.7	48.3	0.0315
01/11/2007 07:38	1.64	2.70	5.6	29.4	48.3	0.0340
01/11/2007 08:08	1.58	2.86	6.3	38.6	61.0	0.0259
01/11/2007 08:38	1.67	2.69	5.9	32.3	54.0	0.0309
01/11/2007 09:08	1.69	2.86	5.6	28.5	48.3	0.0350
01/11/2007 09:38	1.57	2.45	5.6	30.7	48.3	0.0325
01/11/2007 10:08	1.63	3.07	5.6	29.6	48.3	0.0338
01/11/2007 10:38	1.78	2.80	5.9	30.3	54.0	0.0330
01/11/2007 11:08	1.61	2.37	5.9	33.5	54.0	0.0298
01/11/2007 11:38	1.54	2.80	5.6	31.3	48.3	0.0319
01/11/2007 12:08	1.65	3.05	5.6	29.2	48.3	0.0342
01/11/2007 12:38	1.49	2.65	5.6	32.4	48.3	0.0309
01/11/2007 13:08	1.57	2.65	5.6	30.7	48.3	0.0325
01/11/2007 13:38	1.68	2.77	5.9	32.1	54.0	0.0311
01/11/2007 14:08	1.57	2.54	5.9	34.4	54.0	0.0291
01/11/2007 14:38	1.47	2.48	6.3	41.5	61.0	0.0241
01/11/2007 15:08	1.52	2.65	5.6	31.7	48.3	0.0315
01/11/2007 15:38	1.34	2.64	5.6	36.0	48.3	0.0278
01/11/2007 16:08	1.28	2.23	5.9	42.1	54.0	0.0237
01/11/2007 16:38	1.25	2.01	5.6	38.6	48.3	0.0259
01/11/2007 17:08	1.25	2.09	5.3	34.5	43.2	0.0289
01/11/2007 17:38	1.21	2.23	5.3	35.7	43.2	0.0280
01/11/2007 18:08	1.22	1.92	5.9	44.2	54.0	0.0226
01/11/2007 18:38	1.15	2.18	5.3	37.5	43.2	0.0266
01/11/2007 19:08	1.21	2.25	4.8	29.2	35.4	0.0342
01/11/2007 19:38	1.23	2.03	5.3	35.1	43.2	0.0285
01/11/2007 20:08	1.31	2.44	5.9	41.2	54.0	0.0243
01/11/2007 20:38	1.30	2.06	5.9	41.5	54.0	0.0241
01/11/2007 21:08	1.21	1.97	5.6	39.9	48.3	0.0251
01/11/2007 21:38	1.16	2.05	5.3	37.2	43.2	0.0269
01/11/2007 22:08	1.08	2.06	5.9	49.9	54.0	0.0200
01/11/2007 22:38	1.02	1.91	5.0	38.2	39.0	0.0261
01/11/2007 23:08	1.02	2.06	4.8	34.7	35.4	0.0288

MODEL					
vrijeme2	Hs2	Tp2	smjer	Lp2	strmost_vala2
01/11/2007 00:00	1.970468	6.127785	46.60101	58.6	0.0336
01/11/2007 01:00	2.00273	6.125832	47.42255	58.6	0.0342
01/11/2007 02:00	1.98199	6.135109	48.33388	58.8	0.0337
01/11/2007 03:00	1.889953	6.137062	48.82118	58.8	0.0321
01/11/2007 04:00	1.819486	6.118019	48.99149	58.4	0.0311
01/11/2007 05:00	1.78772	6.089699	49.17769	57.9	0.0309
01/11/2007 06:00	1.798027	6.06089	49.46236	57.4	0.0313
01/11/2007 07:00	1.819187	6.039406	50.06114	56.9	0.0319
01/11/2007 08:00	1.838249	6.030617	50.85315	56.8	0.0324
01/11/2007 09:00	1.824834	6.026222	51.15111	56.7	0.0322
01/11/2007 10:00	1.70884	5.996437	50.34407	56.1	0.0304
01/11/2007 11:00	1.568971	5.928078	49.73436	54.9	0.0286
01/11/2007 12:00	1.435043	5.841652	48.9469	53.3	0.0269
01/11/2007 13:00	1.40601	5.736671	47.82349	51.4	0.0274
01/11/2007 14:00	1.387835	5.636574	47.73912	49.6	0.0280
01/11/2007 15:00	1.366669	5.568703	48.47731	48.4	0.0282
01/11/2007 16:00	1.33157	5.541847	49.85864	48.0	0.0278
01/11/2007 17:00	1.302989	5.556984	51.26245	48.2	0.0270
01/11/2007 18:00	1.267003	5.584816	52.55968	48.7	0.0260
01/11/2007 19:00	1.213082	5.605812	53.44537	49.1	0.0247
01/11/2007 20:00	1.138399	5.607277	53.64629	49.1	0.0232
01/11/2007 21:00	1.058361	5.583839	53.07338	48.7	0.0217
01/11/2007 22:00	0.934799	5.536476	51.81676	47.9	0.0195
01/11/2007 23:00	0.907684	5.441261	50.33664	46.2	0.0196
02/11/2007 00:00	0.908957	5.300148	48.60962	43.9	0.0207
02/11/2007 01:00	0.951232	5.183449	46.6933	41.9	0.0227
02/11/2007 02:00	0.981524	5.081398	45.34077	40.3	0.0243
02/11/2007 03:00	0.96658	5.013039	44.99995	39.2	0.0246
02/11/2007 04:00	0.883163	4.979836	45.23366	38.7	0.0228
02/11/2007 05:00	0.802395	4.949562	45.31458	38.2	0.0210
02/11/2007 06:00	0.781435	4.901222	44.81061	37.5	0.0208
02/11/2007 07:00	0.80839	4.838722	43.64516	36.6	0.0221
02/11/2007 08:00	0.707261	4.796242	43.3382	35.9	0.0197
02/11/2007 09:00	0.490433	4.768898	43.56444	35.5	0.0138
02/11/2007 10:00	0.404334	4.73716	42.93839	35.0	0.0115
02/11/2007 11:00	0.460799	4.686378	40.95903	34.3	0.0134
02/11/2007 12:00	0.426431	4.625832	38.93901	33.4	0.0128
02/11/2007 13:00	0.33987	4.56382	37.41771	32.5	0.0105
02/11/2007 14:00	0.279736	4.486183	36.18661	31.4	0.0089
02/11/2007 15:00	0.259351	4.392921	34.91492	30.1	0.0086
02/11/2007 16:00	0.255301	4.319679	33.68489	29.1	0.0088
02/11/2007 17:00	0.239995	4.24839	32.99948	28.2	0.0085
02/11/2007 18:00	0.24499	4.164406	32.88254	27.1	0.0090
02/11/2007 19:00	0.253551	4.030128	33.37076	25.4	0.0100
02/11/2007 20:00	0.284446	3.871925	34.56352	23.4	0.0122
02/11/2007 21:00	0.334303	3.701027	36.14107	21.4	0.0156
02/11/2007 22:00	0.348713	3.716164	37.92043	21.6	0.0162