

Vjetrovalna klima za potrebe lučice Zavalatica

Žuljević, Kristijan

Undergraduate thesis / Završni 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:237:113926>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-05**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Kristijan Žuljević

**VJETROVALNA KLIMA ZA POTREBE LUČICE
ZAVALATICA**

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Kristijan Žuljević

**VJETROVALNA KLIMA ZA POTREBE LUČICE
ZAVALATICA**

ZAVRŠNI ISPIT

doc. dr. sc. Damjan Bujak mag. ing. aedif

Zagreb, 2024



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Kristijan Žuljević

**WIND REGIME REQUIREMENT FOR
ZAVALATICA BAY HARBOR**

FINAL EXAM

doc. dr. sc. Damjan Bujak mag. ing. aedif

Zagreb, 2024

ZAHVALE

Želim izraziti zahvalnost svom mentoru, doc. dr. sc. Damjanu Bujaku, za izdvojeno vrijeme, savjete, smjernice te pristupačnost tijekom cijelog procesa izrade ovog rada.

SAŽETAK

Pomorske građevine suočavaju se s jedinstvenim izazovima morskog okoliša, a njihova stabilnost i dugovječnost ovise o detaljnim proračunima projektnih valova. Proračuni funkcionalnosti i konstrukcije temelje se na analizama povratnih razdoblja valova, koje variraju ovisno o tipu građevine i uvjetima. U ovom radu procjenjuje se valna visina ispred marine Zavalatica za povratna razdoblja od 5 i 100 godina, koristeći dostupne vremenske serije i numeričke modele za analizu valnih parametara. U ovoj analizi modeliranje valova korištenjem SWAN modela, detaljno su prikazani dugoročni statistički podaci i numerički izračuni za područje istočnog Jadranskog mora. Korištenje nestrukturirane mreže omogućilo je preciznije simulacije valova, osobito u blizini obale, čime su rezultati pridonijeli boljem razumijevanju valnih deformacija. Ovi podaci ključni su za daljnji razvoj obalnih infrastrukturnih projekata, optimizaciju dizajna i smanjenje rizika od oštećenja. U narednim analizama potrebno je uzeti u obzir i učinak vjetra unutar akvatorija jer će povećati značajne valne visine ispred uvale zavalatica.

Ključne riječi: valne simulacije; SWAN; agitacija akvatorija; luke; numeričko modeliranje

SUMMARY

Maritime structures face unique challenges posed by the marine environment, and their stability and longevity depend on detailed calculations of design waves. The functionality and structural calculations are based on analyses of wave return periods, which vary depending on the type of structure and conditions. This paper evaluates wave height in front of the Zavalatica marina for return periods of 5 and 100 years, using available time series and numerical models to analyze wave parameters. In this wave modeling analysis, using the SWAN model, long-term statistical data and numerical calculations for the eastern Adriatic Sea are presented in detail. The use of an unstructured grid allowed for more precise wave simulations, especially near the shore, resulting in a better understanding of wave deformations. These data are crucial for the further development of coastal infrastructure projects, design optimization, and risk reduction of damage. Future analyses must take into account the effect of wind within the basin, as it will increase significant wave heights in front of the Zavalatica bay.

Key words: wave simulations; SWAN; basin agitation; harbors; numerical modeling

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| ZAHVALE (NEOBAVEZNO) | i |
| SAŽETAK | i |
| SUMMARY | ii |
| SADRŽAJ | i |
| 1 UVOD | 1 |
| 2 METODOLOGIJA | 6 |
| 2.1 Dugoročna valna klima | 6 |
| 2.2 Vremenska serija valnih parametara južno od Lastova | 8 |
| 2.3 Spektralni model za proračun valnih deformacija | 9 |
| 2.3.1 Vladajuće jednačbe | 9 |
| 2.3.2 Domena numeričkog modela | 9 |
| 3 REZULTATI | 13 |
| 3.1 Dugoročna valna klima | 13 |
| 3.2 Transformacije valnih parametara unutar domene numeričkog modela | 17 |
| 4 ZAKLJUČAK | 31 |
| POPIS SLIKA | 34 |
| POPIS TABLICA | 35 |

1 UVOD

Uz poznate izazove koje donosi kopneno okruženje, pomorske građevine se suočavaju s jedinstvenim utjecajima koji proizlaze iz morskog okoliša, morskih valova i razina mora. Ovi čimbenici imaju ključnu ulogu u oblikovanju i izgradnji pomorskih građevina, budući da mogu imati značajan utjecaj na njihovu funkcionalnost i dugovječnost. Neki tipovi pomorskih građevina ili njihove konstrukcije posebno su osjetljivi na djelovanje morskog okoliša, pri čemu valovi i razine vode postaju dominantni faktori koji ih oblikuju i utječu na njihovu stabilnost i trajnost. Stoga je ključno provesti detaljne proračune koji uzimaju u obzir ove specifične okolišne utjecaje [1,3,4,5].

Proračuni pomorskih građevina najčešće se temelje na analizi projektnih valova. Projektni valovi su ekstremni uvjeti valova koji se očekuju tijekom životnog vijeka građevine. Takvi valovi su različiti ovisno o vrsti proračuna koji se provodi. Kada govorimo o proračunima funkcionalnosti, krajnji cilj je osigurati da pomorska građevina izdrži ekstremne uvjete morskog okoliša dok preuzima svoju namjenu. To obuhvaća osiguravanje stabilnosti plutajućih platformi, zaštite obalnih konstrukcija od erozije ili osiguravanje sigurnog prolaza plovila kroz luke ili kanale. S druge strane, proračuni konstrukcije fokus imaju na oblikovanju samih građevina kako bi se osiguralo da će podnijeti snagu projektnog vala. Ovakva analiza sadrži procjenu čvrstoće, stabilnosti i otpornosti građevinskih elemenata poput stupova, greda, platformi i drugih dijelova pomorskih konstrukcija. Služeći se ovakvim proračunima, inženjeri mogu osmisliti i izgraditi pomorske građevine koje su sposobne podnijeti zahtjeve ekstremnih morskih uvjeta, osigurati njihovu sigurnost, funkcionalnost i dugotrajnost u okolišu koji je nepredvidljiv i dinamičan [2,4,5].

Utjecaj morskog okoliša na pomorske građevine obuhvaća ekstremna djelovanja koja su definirana projektnim povratnim razdobljem, označenim kao PR, koje može biti 5, 50, 100 ili više godina. Ova povratna razdoblja predstavljaju procjenu vremenskog razdoblja između ponavljanja ekstremnih događaja, poput valova ili drugih prirodnih pojava. Valno djelovanje obično se procjenjuje kroz projektnu valnu visinu, označenu kao H_{proj} koja ovisi o vrsti proračuna i tipu konstrukcije. Ovo je ključni parametar koji se koristi za određivanje snage i intenziteta valova s kojima će se građevina suočiti tijekom svog radnog vijeka. Dok se projektni valni period, označen kao T_{proj} , ne propisuje unaprijed, već se određuje analizom odgovarajućeg raspona valnih perioda kako bi se identificirao najnepovoljniji scenarij za razmatrani proračun. Općenito, funkcionalni proračuni se provode za povratna razdoblja $PR \geq 5$ godina (kako je prikazano u Tablici 1: Izbor projektne valne visine H_{proj} ovisno o vrsti proračuna i tipu građevine), dok se proračuni konstrukcije obično provode za povratna razdoblja $PR=50$ do 100 godina [3,5,6].

**Tablica 1: Izbor projektne valne visine (H_{proj}) ovisno o vrsti proračuna i tipu građevine
(Izvor: [3,5,6,7])**

| PROJEKTNI VAL prognozirani (ili u rijetkim slučajevima izmjereni) | | |
|--|---------------------|---|
| FUNKCIONALNOST GRAĐEVINE | | |
| 1. AGITACIJA BAZENA (prekrcajni dani) | $H_{1/3}^{5god}$ | VAL 5-GODIŠNJEG POVRATNOG RAZDOBLJA |
| 2. PRELIJEVANJE | H_{max}^{5god} | |
| | | H_{max}^{100god} |
| PRORAČUN KONSTRUKCIJE | | |
| 1. NASIPNE GRAĐEVINE (fleksibilne konstrukcije) | $H_{1/10}^{100god}$ | VAL 100-GODIŠNJEG POVRATNOG RAZDOBLJA |
| 2. VERTIKALNE STIJENE (krute konstrukcije) | H_{max}^{100god} | |
| 3. GRAĐEVINE NA PILOTIMA (krute konstrukcije) | | |

Proračuni funkcionalnosti, poput onih koji analiziraju agitaciju lučkog bazena i situacije tijekom prekrcajnih dana na pomorskim građevinama, obično se provode uzimajući u obzir manje vrijednosti djelovanja morskog okoliša (s povratnim razdobljem $PR \geq 5$ godina). To je pristup koji se razlikuje od proračuna konstrukcija, koji se temelje na većim vrijednostima povratnog razdoblja ($PR=50$ do 100 godina). Ovakav pristup proizlazi iz spremnosti da se u radnom vijeku pomorske građevine tolerira određena razina nefunkcioniranja. Standardni proračuni funkcionalnosti, kao što su oni koji se bave analizom prelijevanja, obično su usmjereni na povratna razdoblja u rasponu od 5 do 100 godina. Međutim, za specijalne vrste pomorskih građevina koje su podložne ekstremnim uvjetima, analize se mogu proširiti i na povratna razdoblja koja dosežu i do 10.000 godina. Ovaj pristup omogućuje inženjerima da pravilno procjene i upravljaju rizicima te osiguraju dugoročnu održivost i funkcionalnost pomorskih građevina [5].

Tablica 2: Primjeri preporučenih razina zaštite od prelijevanja valovima u skladu s povratnim razdobljima (Izvor: [5,8,9])

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

Proračuni konstrukcija pomorskih građevina rade se uzimajući u obzir visoke vrijednosti djelovanja morskog okoliša, posebno za povratna razdoblja od 50 do 100 godina. Razlog tome leži u činjenici da u radnom vijeku građevine ne može biti tolerirana visoka vjerojatnost značajnih oštećenja. U takvim situacijama postoji mogućnost za ozbiljne posljedice, uključujući ljudske žrtve i velike materijalne štete. Za građevine čije nefunkcioniranje ili kolaps mogu ozbiljno ugroziti širu društvenu zajednicu, projektno povratno razdoblje može biti veće od 100 godina. U svim slučajevima, projektno povratno razdoblje za proračun konstrukcija veće je ili jednako od očekivanog radnog vijeka same građevine: $PR[\text{god}] \geq LT[\text{god}]$. Ovo osigurava da su proračuni konstrukcija dovoljno robusni i da mogu osigurati sigurnost i trajnost građevine tijekom njezinog radnog vijeka [5,6].

Tablica 3: Orijentacijske granične valne visine za razne operacije prilikom uplovljavanja i prekrcaja brodova u luci i marini (Izvor: [5,10,11,12])

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

Tablica 4: Preporučeni proračunski radni vijek građevine (Izvor: [2,7,13])

| | |
|---------------------------|-------|
| Privremene građevine | 1-5 |
| Instalacije | 15-25 |
| Fiksne pomorske građevine | 50 |

U okviru ovog rada procjenjivat će se dugoročna valna prognoza u svrhu rekonstrukcije obalnih građevina na lokaciji marine Zavalatica na Korčuli. Stoga će se, u skladu s prethodnim tekstom u ovom poglavlju, procjenjivati valna visina ispred marine Zavalatica za 5-godišnje i 100-godišnje povratno razdoblje. Izvor podataka koji pruža vremensku seriju valnih visina na lokaciji udaljenoj od utjecaja otočja prikazan je u poglavlju 2.2, metoda procjene ekstremnih valnih

parametara u poglavlju 2.1, kao i regionalni numerički model propagacije valova koji služi za proračun transformacije parametara valova od udaljene lokacije do područja ispred marine Zavalatica, ponajprije zbog utjecaja otočja, u poglavlju 2.3.

2 METODOLOGIJA

2.1 Dugoročna valna klima

Dugoročne prognoze vjetrovnih valova temelje se na statističko-vjerojatnosnim metodama kojima se određuju povratna razdoblja za specifična stacionarna stanja mora, koja obično traju između 5 i 15 minuta. Ove se prognoze mogu izrađivati koristeći podatke o vjetru ili valovima. Za očekivat je da su prognoze preciznije kada se temelje na podacima o valovima. Međutim, u nedostatku takvih podataka, što je vrlo čest slučaj, koristi se analiza temeljena na podacima o vjetru. Dugoročne prognoze provode se tako da se reprezentativnim valnim parametrima pridruže određene vjerojatnosti ili povratna razdoblja, izražena u godinama. Optimalno je imati najmanje 30 godina opažanja za izradu ovakvih prognoza, dok je minimalni period za prikupljanje podataka 10 godina, iako se iznimno može koristiti i 5 godina podataka. Pouzdanost dugoročne prognoze najbolje se ostvaruje kada je povratno razdoblje trostruko duže od razdoblja opažanja. Reprezentativni parametri H_s i T_s , koji opisuju valne situacije, formiraju nizove statistički nezavisnih podataka. Ovi nizovi predstavljaju uzorke pripadajućih slučajnih varijabli – značajne valne visine \hat{H}_s i značajnog valnog perioda \hat{T}_s – koje imaju svoje specifične raspodjele vjerojatnosti [5].

Postoje dva glavna matematička pristupa za prikazivanje raspodjele reprezentativnih valnih parametara tijekom dugih vremenskih razdoblja:

1. Jednodimenzionalna raspodjela za jednu slučajnu varijablu, najčešće \hat{H}_s
2. Dvodimenzionalna raspodjela za istovremenu pojavu slučajnih varijabli \hat{H}_s i \hat{T}_s .

Mogućnost istovremenog pojavljivanja značajne valne visine i značajnog valnog perioda, tj. slučajnog vektora (\hat{H}_s, \hat{T}_s) , može se učinkovito prikazati dvodimenzionalnom Log-normalnom ili Weibullovom funkcijom raspodjele vjerojatnosti. Promatranjem samo jedne slučajne varijable, značajna valna visina \hat{H}_s može se opisati Log-normalnom, Gumbelovom, Frechetovom ili Weibullovom funkcijom raspodjele vjerojatnosti, dok se valni period \hat{T}_s najčešće opisuje Log-normalnom funkcijom raspodjele. U daljnjoj analizi, fokus će biti na jednodimenzionalnoj raspodjeli za značajne valne visine. Ovaj pristup omogućuje detaljniju analizu i precizniju predikciju specifičnih valnih uvjeta koji se mogu očekivati tijekom dugih vremenskih razdoblja [5].

Kroz ovaj metodološki okvir, povećava se pouzdanost dugoročnih prognoza i modeliranja valnih situacija, što je od ključne važnosti za brojne primjene u pomorskom inženjerstvu i sigurnosti plovidbe.

Dugoročne prognoze valnih parametara igraju ključnu ulogu u planiranju i dizajnu obalnih struktura. To uključuje izgradnju luka, morskih vjetroelektrana, naftnih platformi te drugih inženjerskih projekata koji zahtijevaju precizne podatke o uvjetima mora. Pouzdane prognoze omogućuju smanjenje rizika od oštećenja i povećanje sigurnosti tih struktura. Također, pridonose optimizaciji troškova izgradnje i održavanja, osiguravajući dugoročnu održivost i učinkovitost investicija u pomorsku infrastrukturu.

Postoje dvije metode jednodimenzionalne raspodjele, to su:

1. Metoda prekoračenja visokog praga za određivanje uzorka
2. Metoda godišnjih ekstrema za određivanje uzorka

Za daljnje potrebe ćemo koristiti Metodu godišnjih ekstrema za određivanje uzorka, nešto više o samom postupku slijedi u nastavku poglavlja 2.1.

Ako imamo dostupan uzorak iz 30-godišnjeg promatranja slučajne varijable \hat{H}_s , možemo iz toga izvući jednodimenzionalnu raspodjelu vjerojatnosti ekstrema. Primjerice, iz cijelog uzorka s promatranjem od 30 godina izdvajaju se godišnji maksimumi (najveći godišnji H_s) i formira se uzorak. Na temelju tog uzorka određuje se raspodjela vjerojatnosti ekstrema. Uzorak napravljen na temelju godišnjih ekstrema također nosi naziv "niz maksimuma". Oba navedena tipa uzorka, zajedno s odgovarajućom jednodimenzionalnom raspodjelom vjerojatnosti, omogućuju izračun reprezentativnih valnih parametara (npr. H_s^{PR}) za male vjerojatnosti (vrlo rijetko pojavljivanje), kao i za dugotrajna povratna razdoblja od 1-godišnjeg do 100-godišnjeg. Postupak izračuna je isti i za dugoročnu raspodjelu (promatranje tijekom 10 godina) i za raspodjelu ekstrema (promatranje tijekom 30 godina) [5,6].

Prvo se iz uzorka određuje empirijska raspodjela vjerojatnosti. To podrazumijeva sortiranje uzorka po opadajućem redoslijedu i izračun empirijske vjerojatnosti premašenja pomoću Hazenove formule:

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

Nakon izračuna empirijske vjerojatnosti premašenja parovi $[H_{s,i}; P(\hat{H}_s \geq H_{s,i})]$ se prikazuju kao točke u koordinatnom sustavu H_s ; $P(\hat{H}_s \geq H_s)$ što predstavlja empirijsku raspodjelu vjerojatnosti slučajne varijable značajne valne visine \hat{H}_s . Na x-osi su vrijednosti značajne valne visine $H_{s,i}$, dok su na y-osi vjerojatnosti premašenja $P(\hat{H}_s \geq H_{s,i})$. Prilagodбом krivulje na ovaj skup točaka $[H_{s,i}; P(\hat{H}_s \geq H_{s,i})]$ dobiva se teorijska funkcija raspodjele vjerojatnosti $P(\hat{H}_s \geq H_s) \equiv P(H_s)$. Vjerojatnost dosezanja ili prekoračenja bilo koje vrijednosti $H_{s,i}$, čak i onih vrlo rijetkih koje nikada nisu izmjerene, može se odrediti grafikonom ekstrapolacije teorijske funkcije raspodjele vjerojatnosti izvan područja dostupnih podataka.

Međutim, ekstrapolacija je nepouzdan način jer prilagodba krivulje na skupu točaka nije jednoznačna. Različiti tipovi krivulja mogu dobro odgovarati skupu točaka, što rezultira različitim ekstrapolacijom izvan područja dostupnih podataka. Kako bi se riješio ovaj problem, osi x se logaritmiraju ($\ln(H_s)$), pretvarajući funkciju raspodjele vjerojatnosti u linearnu. Time se empirijska funkcija raspodjele vjerojatnosti, odnosno skup parova, prilagođava u pravac, a teorijska funkcija raspodjele vjerojatnosti jednoznačno se određuje [5,7].

Kada je jednom poznata linearna funkcija raspodjele vjerojatnosti, povratno razdoblje bilo koje vrijednosti slučajne varijable značajne valne visine $H_{s,i}$ može se odrediti prema izrazu:

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

2.2 Vremenska serija valnih parametara južno od Lastova

MEDSEA_MULTIYEAR_WAV_006_012 je višegodišnji proizvod valova prognostičkog sustava za Sredozemno more (Med-WAV). Sadrži skupove podataka ponovne analize, privremeni skup podataka koji pokriva razdoblje nakon ponovne analize do jednog mjeseca prije sadašnjosti te mjesečni klimatološki skup podataka (referentno razdoblje 1993.-2016.). Skup podataka ponovne analize predstavlja višegodišnju ponovnu analizu valova koja počinje od siječnja 1993. godine, sastavljenu od satnih parametara valova s horizontalnom rezolucijom od $1/24^\circ$, pokrivajući Sredozemno more i protežući se do $18,125^\circ$ zapadno u Atlantski ocean. Med-WAV sustav modeliranja temelji se na modelu valova WAM 4.6.2 i razvijen je kao ugniježđeni slijed dvije računalne mreže (grube i fine) kako bi se osiguralo da se dugi valovi koji dolaze iz Sjevernog Atlantika (NA) prema Gibraltarskom prolazu pravilno unose u Sredozemno more. Gruba mreža pokriva Sjeverni Atlantski ocean od 75° zapadno do 10° istočno i od 70° sjeverno do 10° južno u rezoluciji $1/6^\circ$, dok fina ugniježđena mreža pokriva Sredozemno more od $18,125^\circ$ zapadno do $36,2917^\circ$ istočno i od $30,1875^\circ$ sjeverno do $45,9792^\circ$ sjeverno s rezolucijom od $1/24^\circ$. Sustav modeliranja rješava prognostički dio spektra valova s 24 smjerna i 32 logaritamski raspoređena frekvencijska pretinca. Sustav valova također uključuje shemu optimalne interpolacije koja asimilira značajnu visinu valova prema satelitskim opažanjima dostupnima kroz CMEMS i prisiljen je dnevno prosječnim strujama iz Med-Physics te s 1-satnim, horizontalnim rezolucijama od $0,25^\circ$ ERA5 reanalize vjetrova 10 m iznad morske površine iz ECMWF-a. [14]

2.3 Spektralni model za proračun valnih deformacija

2.3.1 Vladajuće jednadžbe

Numerički modela treće generacije za modeliranje valova SWAN (verzija 41.41 se koristi u ovom radu), razvijena je u Fortran90 na Sveučilištu u Delftu. Numerički model je poznat po izuzetnim performansama u modeliranju valova, što uključuje i generiranje valova vjetrom. SWAN se temelji na jednadžbi dinamičke spektralne ravnoteže i može se prikazati u kartezijanskim koordinatama na sljedeći način:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial C_x N}{\partial x} + \frac{\partial C_y N}{\partial y} + \frac{\partial C_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma}, \quad (1)$$

$$N = \frac{E}{\sigma}, \quad (2)$$

gdje lijeva strana jednadžbe 5 predstavlja kinematičku komponentu i prikazuje derivacije gustoće energije N u zemljopisnom i spektralnom prostoru. C_x i C_y su kartezijske koordinatne komponente brzine grupe valova u zemljopisnom prostoru, dok su C_θ i C_σ spektralne komponente brzine grupe valova. Efektivna gustoća energije N omjer je energetskog spektra valova $E(\sigma, \theta)$ i frekvencijske σ . Pojam S na desnoj strani predstavlja ukupan izvor energije valova. Ukupni izvor sastoji se od sljedećih komponenti:

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{bot} + S_{br} + S_{nl3} + S_{nl4}, \quad (3)$$

gdje je S_{in} unos energije zbog vjetra, S_{ds} je disipacija zbog white-capping fenomena, S_{nl4} je nelinearni prijenos energije vala, S_{nl3} je nelinearna interakcija trijadna, S_{fric} je disipacija zbog trenja vala na dnu, a S_{brk} je disipacija energije zbog do loma valova izazvanog kritičnom dubinom. SWAN korisniku omogućuje uključivanje i isključivanje izvora i ponora u jed. 3, kao i odabir različitih formulacija za svaki izvor u vladajućim jednadžbama. Potpuni opis numeričkog valnog modela može se pronaći u znanstvenim i tehničkim dokumentima SWAN-a [1].

2.3.2 Domena numeričkog modela

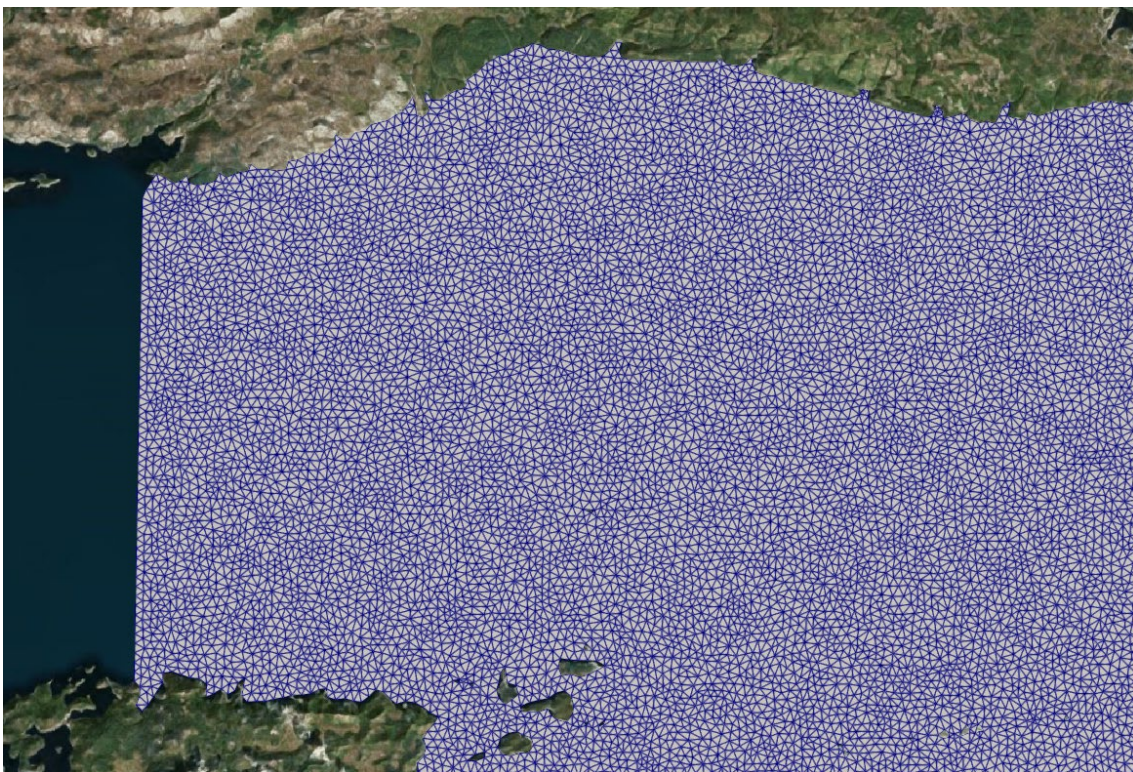
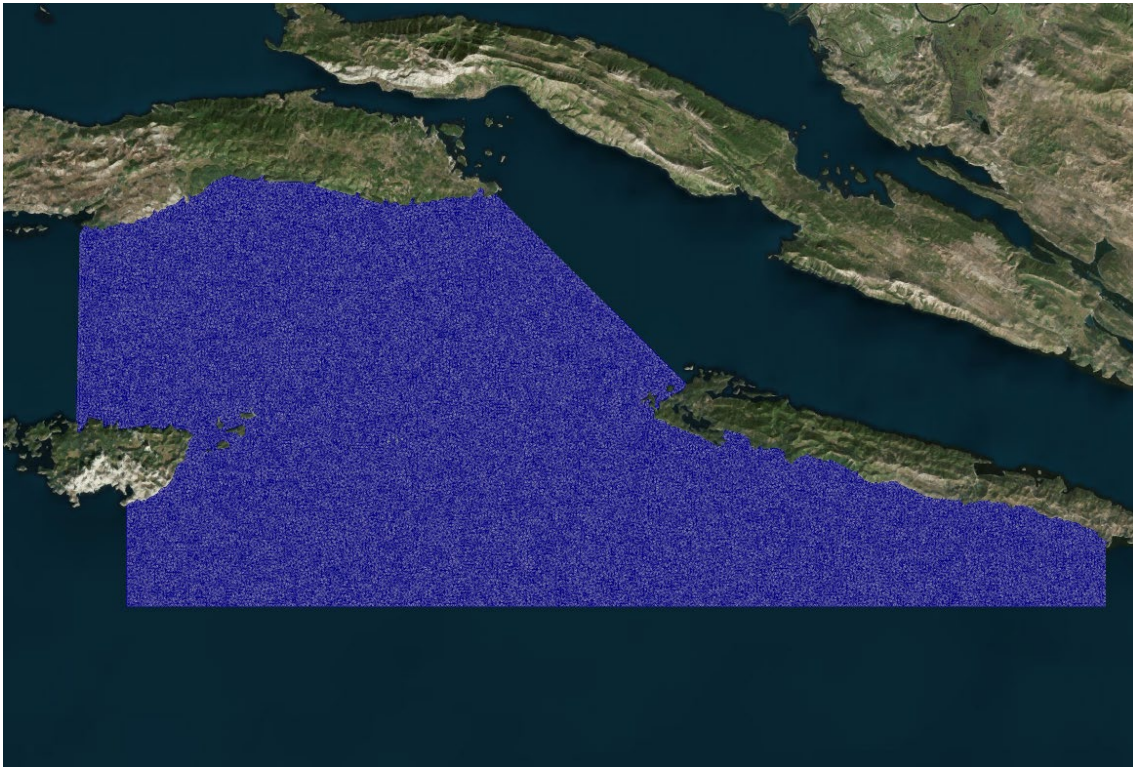
Koristili smo nestrukturiranu mrežu za numerički model valova kako bismo precizno opisali složenu geometriju obale u okolici istočnog dijela otoka Korčule. Prethodna istraživanja koja su koristila mreže grublje od 2 km preporučuju korištenje nestrukturiranih mreža za točno razlučivanje složenih obalnih obilježja, posebno u prisutnosti otoka i složene topografije zbog njihovog učinka difrakcije. S druge strane, nestrukturirana mreža dopušta korištenje grubljih elemenata dalje od obale kako bi se uštedjeli troškovi računanja za veće domene.

Stoga nestrukturirana mreža omogućuje fleksibilno lokalno usklađivanje koje može poboljšati točnost simulacije valova za određena područja u blizini obale. U ovom slučaju se koristila mreža za diskretizaciju modelske prostorne domene s prostornim korakom od cca 100 m. Domena numeričkog modela u ovoj studiji pokriva dio istočnog Jadranskog mora i proteže se preko $16,8^{\circ}$ E – $17,8^{\circ}$ E po zemljopisnoj dužini i $42,6^{\circ}$ N – $42,9^{\circ}$ S po zemljopisnoj širini. Područje, odnosno prostorna domena na kojoj se provode numeričke analize valnih deformacije, obuhvaća akvatorij prikazan na Slika 1.

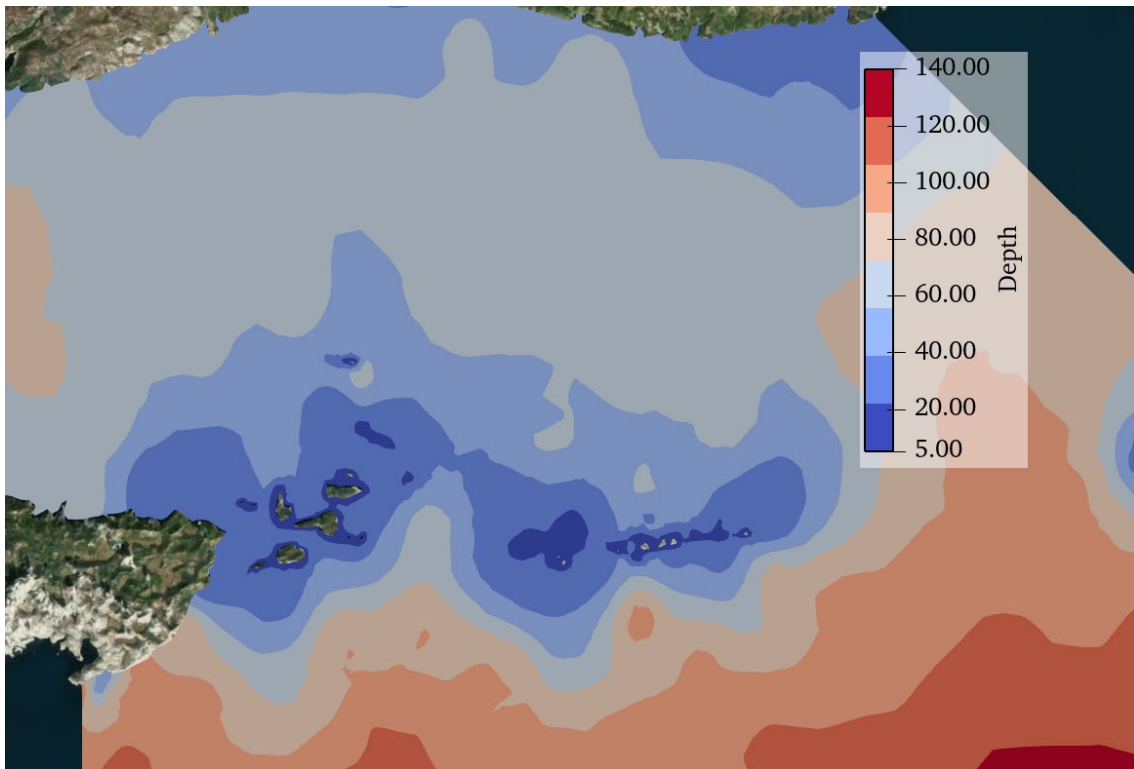
Batimetrijski podaci su preuzeti iz najnovije GEBCO baze podataka. Razlučivost osnovnih batimetrijskih podataka iz GEBCO baze je približno 200 m x 200 m. Kako bi se točno prikazala složena obalna crta, prostorna razlučivost obalnih podataka je 100 m. Dubina najdublje vode je oko 140 m ispod srednje razine mora (MSL) na istočnoj otvorenoj granici.

Za parametrizaciju modela koristili smo postavke prema publiciranom istraživanju za Splitski akvatorij kako je prikazano u radu [15].

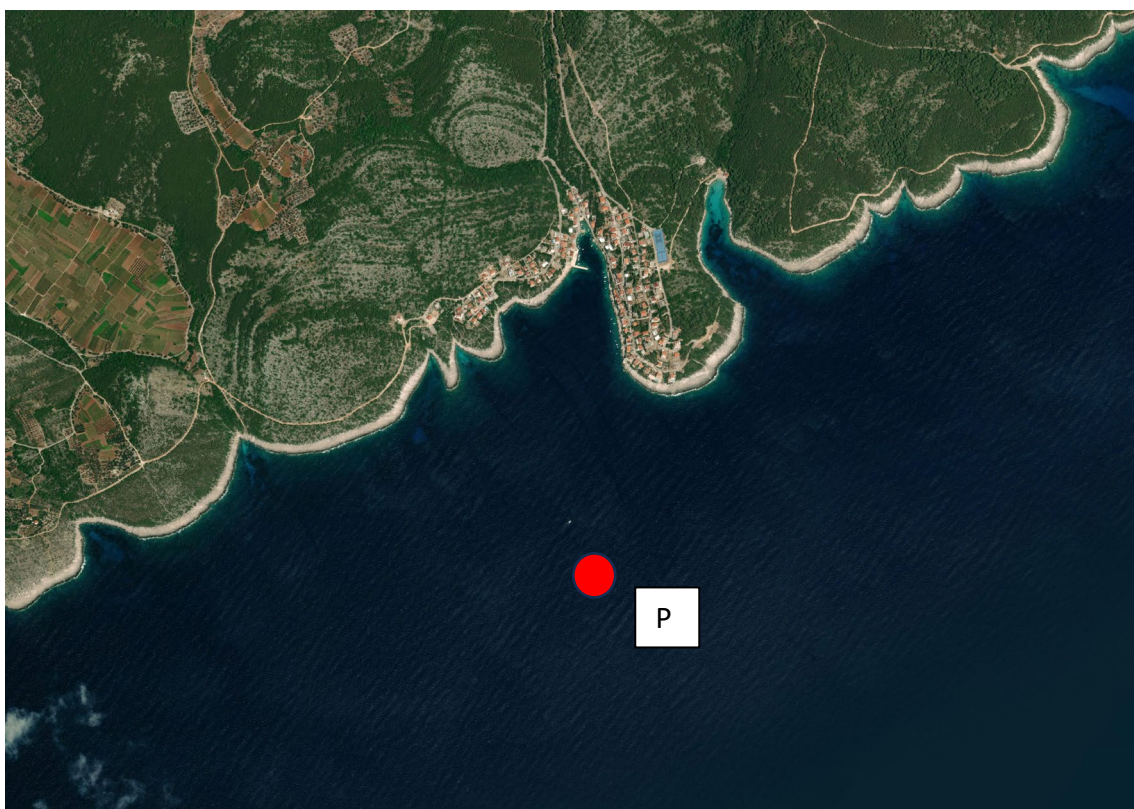
Rubni uvjeti na otvorenoj južnoj granici numeričkog modela definiran je dubokovodnim incidentnim valnim spektrima sa statističkim obilježjima i povratnim periodima definiranim prema 3.1. Na Slika 3 su prikazana je točka za koje su se izvukli relevantne valne parametre koji su od posebnog interesa, te su rezultati prikazani u Tablica 9 prema broju simulacije.



Slika 1: Domena numeričkog modela koji se koristi za proračun valnog generiranja i transformacije u prostoru



Slika 2: Prikaz batimetrije unutar diskretizirane domene



Slika 3: Kontrolne točke za koje se posebno izdvajaju rezultati prema provedenim simulacijama

3 REZULTATI

3.1 Dugoročna valna klima

Iz rezultata javno dostupnog numeričkog modela (opisan u poglavlju 2.2) može se vidjeti tablični prikaz maksimalnih godišnjih valova (Tablica 1).

Sektor za koji se radi proračun dugogodišnje prognoze valova je u rasponu 110-200 stupnjeva od smjera N.

Tablica 5: Maksimalne valne visine od 1993. do 2021. godine, i pripadajući smjer vjetra i period vala

| GODINA | Max HMO | VMDR | VTPK |
|--------|---------|------|------|
| 1993 | 4.93 | 150 | 8.4 |
| 1994 | 3.80 | 140 | 8.4 |
| 1995 | 4.95 | 150 | 9.2 |
| 1996 | 4.02 | 140 | 8.4 |
| 1997 | 4.48 | 145 | 9.2 |
| 1998 | 4.97 | 145 | 8.4 |
| 1999 | 4.54 | 175 | 8.4 |
| 2000 | 3.44 | 180 | 7.6 |
| 2001 | 4.50 | 135 | 9.2 |
| 2002 | 4.08 | 145 | 8.4 |
| 2003 | 4.38 | 140 | 8.4 |
| 2004 | 5.82 | 150 | 10.2 |
| 2005 | 3.49 | 175 | 6.9 |
| 2006 | 2.94 | 160 | 6.9 |
| 2007 | 3.37 | 165 | 6.9 |
| 2008 | 4.79 | 145 | 9.2 |
| 2009 | 5.04 | 140 | 9.2 |
| 2010 | 4.36 | 145 | 9.2 |
| 2011 | 4.47 | 145 | 9.2 |
| 2012 | 4.88 | 140 | 9.2 |
| 2013 | 4.57 | 145 | 9.2 |
| 2014 | 3.83 | 145 | 8.4 |
| 2015 | 4.45 | 175 | 8.4 |
| 2016 | 4.75 | 150 | 9.2 |
| 2017 | 3.69 | 185 | 7.6 |
| 2018 | 5.02 | 145 | 9.2 |
| 2019 | 5.91 | 145 | 10.2 |

| | | | |
|------|------|-----|-----|
| 2020 | 4.77 | 145 | 9.2 |
| 2021 | 4.35 | 145 | 8.4 |

U okviru Tablice 6 prikazuje se uzorak uređenih parova srednje značajne valne visine $H_{s,i}$ i pripadnih vjerojatnosti premašenja $P(H_s > H_{s,i})$ izračunatih pomoću Hazenove formule.

Slika 1 prikazuje teorijsku distribuciju raspodjele vjerojatnosti s očitanim vrijednostima značajnih valnih visina za povratne periode PR = 100, 50, 20, 10, 5 god. očitane vrijednosti prikazane su u Tab. 4.

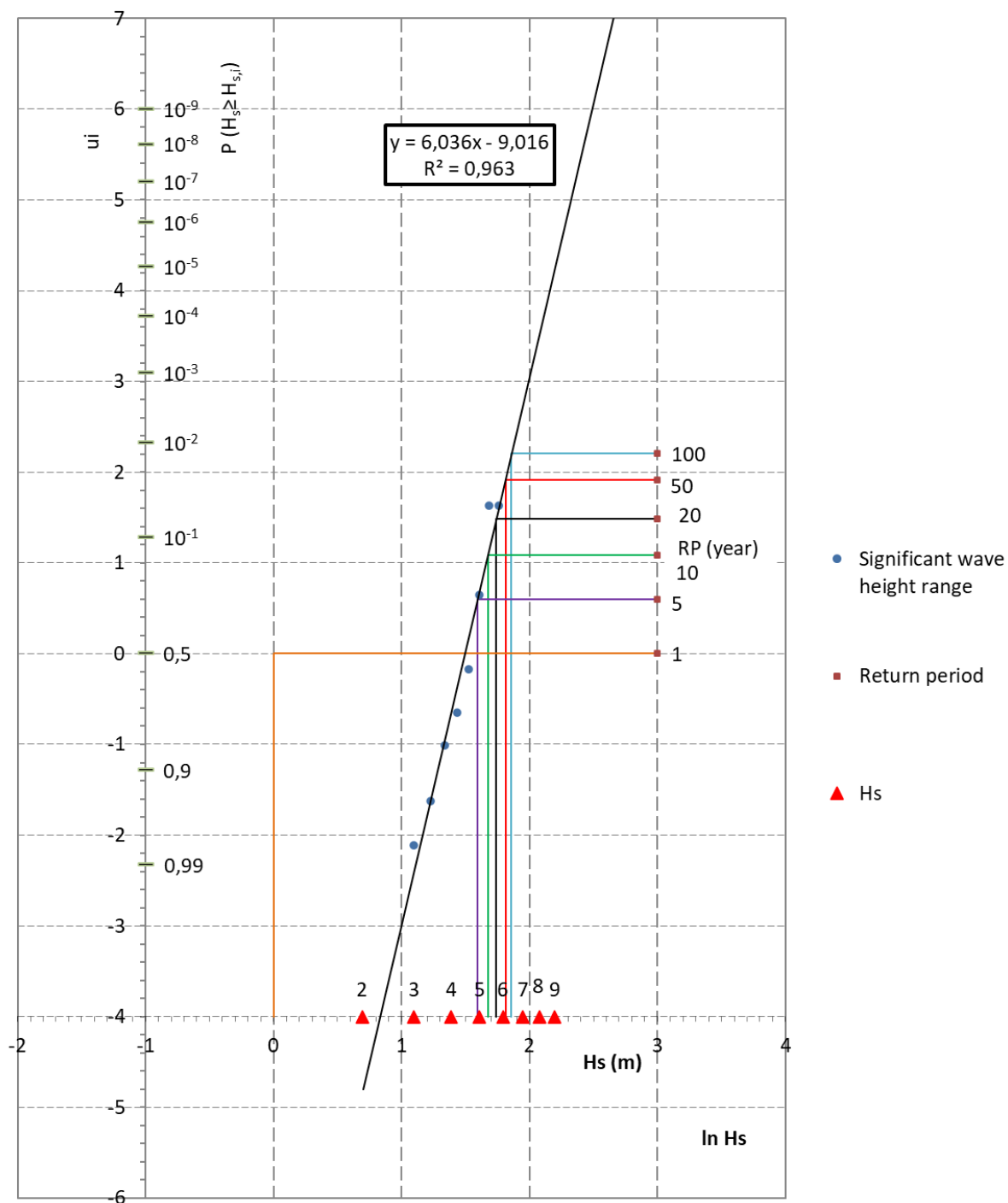
Tablica 6: Razredi valnih visina od za period od 1993.-2021. ispred Korčule za sektor (67.5°-112.5°)

| Razred | Razred valnih visina | Srednja znač. valna visina | Apsolutna učestalost | Kumulativna apsolutna učestalost | Vjerojatnost premašenja | ln ($H_{s,i}$) | u_i |
|--------|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------|-------------|
| | d H_s - u 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 | 0.4-0.8 | 0,6 | 0 | 29 | 0,983 | - | - |
| 2 | 0.8-1.2 | 1,0 | 0 | 29 | 0,983 | - | - |
| 3 | 1.2-1.6 | 1,4 | 0 | 29 | 0,983 | - | - |
| 4 | 1.6-2.0 | 1,8 | 0 | 29 | 0,983 | - | - |
| 5 | 2.0-2.4 | 2,2 | 0 | 29 | 0,983 | - | - |
| 6 | 2.4-2.8 | 2,6 | 0 | 29 | 0,983 | - | - |
| 7 | 2.8-3.2 | 3,0 | 1 | 29 | 0,983 | 1,0986123 | -2,11438077 |
| 8 | 3.2-3.6 | 3,4 | 3 | 28 | 0,948 | 1,2237754 | -1,62836141 |
| 7 | 3.6-4.0 | 3,8 | 3 | 25 | 0,845 | 1,3350011 | -1,01449875 |
| 8 | 4.0-4.4 | 4,2 | 5 | 22 | 0,741 | 1,4350845 | -0,64760358 |
| 9 | 4.4-4.8 | 4,6 | 9 | 17 | 0,569 | 1,5260563 | -0,17374106 |
| 10 | 4.8-5.2 | 5,0 | 6 | 8 | 0,259 | 1,6094379 | 0,647603583 |
| 11 | 5.2-5.6 | 5,4 | 0 | 2 | 0,052 | 1,686399 | 1,628361407 |
| 12 | 5.6-6.0 | 5,8 | 2 | 2 | 0,052 | 1,7578579 | 1,628361407 |
| 13 | 6.0-6.4 | 6,2 | 0 | 0 | -0,017 | - | - |
| 14 | 6.4-6.8 | 6,6 | 0 | 0 | -0,017 | - | - |
| 15 | 6.8-7.2 | 7,0 | 0 | 0 | -0,017 | - | - |
| 16 | 7.2-7.6 | 7,4 | 0 | 0 | -0,017 | - | - |

| | | | | | | | |
|----|---------|-----|---|---|--------|---|---|
| 17 | 7.6-8.0 | 7,8 | 0 | 0 | -0,017 | - | - |
|----|---------|-----|---|---|--------|---|---|

Tablica 7: Rezultati dugoročne prognoze za sektor (67.5°-112.5°) za razdoblje 1993.-2021. u proračunskoj točki P1 ispred Korčule

| PR [god] | Hs (m) za pr. period |
|----------|----------------------|
| 100 | 6.5 |
| 50 | 6.3 |
| 20 | 5.8 |
| 10 | 5.5 |
| 5 | 5.1 |



Slika 4: Graf LOG-NORMALNE distribucije slučajne varijable H_s iz podataka o valovima za period od 1993.-2021. ispred Lastova za sektor (110° - 200°)

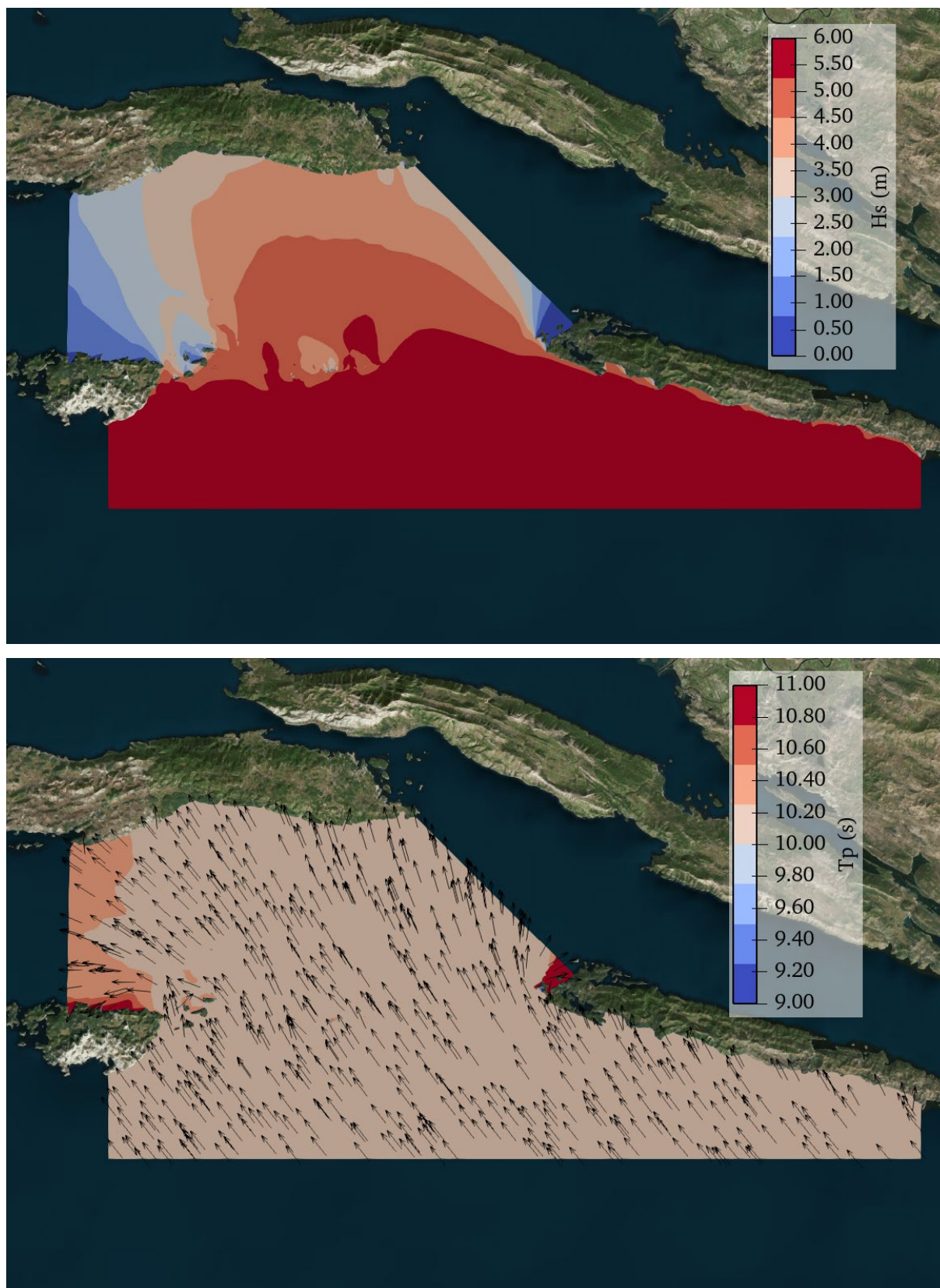
3.2 Transformacije valnih parametara unutar domene numeričkog modela

U ovom poglavlju ćemo prikazati simulacije prema tablici planiranih testova koji se razlikuju po svojim ulaznim podacima (povratni period, visina vala, trajanje vala, smjer vala).

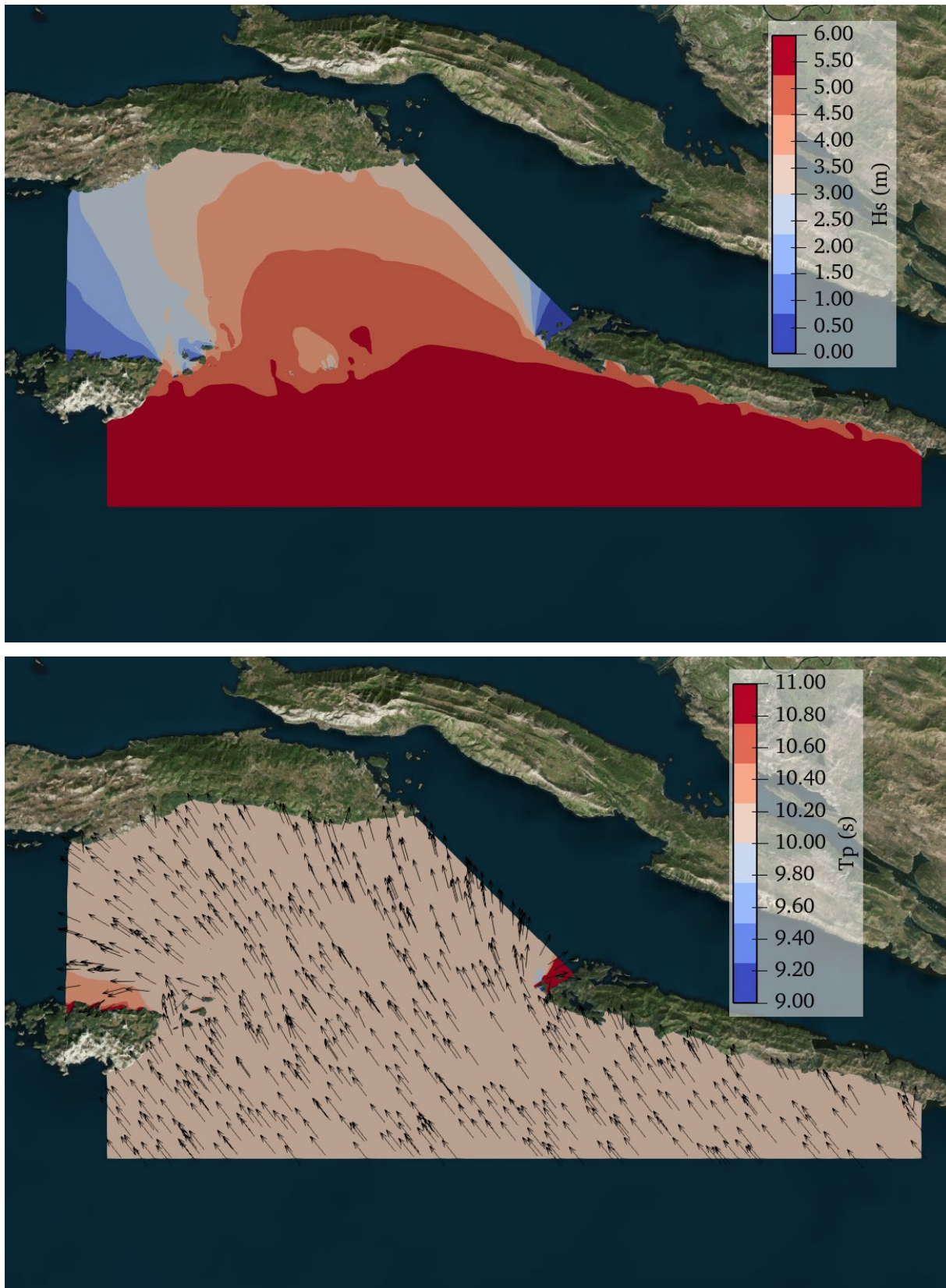
Informacije o numeričkom modelu su dane u poglavlju 2.3. Više o veličini domene modela i njegovim postavkama je moguće vidjeti u poglavlju 2.2. Temeljem dobivenih rezultata, i u ovoj studiji prezentiranih grafičkih priloga moguće je vidjeti cijelo valno polje za sve analizirane uvjete valova i vjetra prema tablici simulacija (Tablica 8).

Tablica 8: Tablica planiranih testova valne transformacije unutar ovog rada

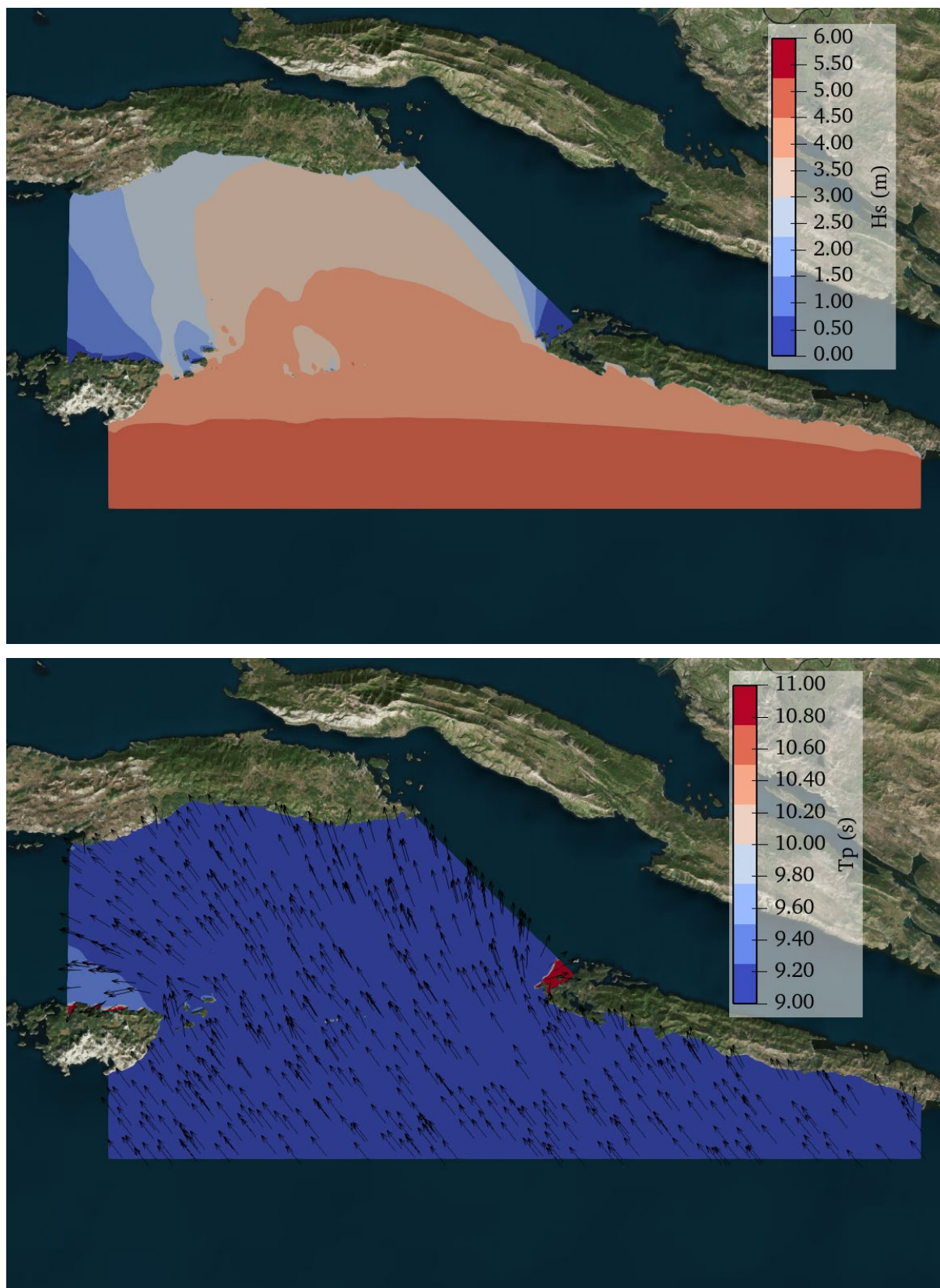
| N | PP | Vjetar u domeni | | Val na rubnom uvjetu | | |
|----|-----|---------------------|--------------|----------------------|--------|-------|
| | | Brzina vjetra (m/s) | Smjer vjetra | Hs (m) | Tp (s) | Smjer |
| 1 | 100 | - | - | 6.5 | 10.21 | 140 |
| 2 | 50 | - | - | 6.3 | 10.05 | 140 |
| 3 | 5 | - | - | 5.1 | 9.04 | 140 |
| 4 | 100 | - | - | 6.5 | 10.21 | 150 |
| 5 | 50 | - | - | 6.3 | 10.05 | 150 |
| 6 | 5 | - | - | 5.1 | 9.04 | 150 |
| 7 | 100 | - | - | 6.5 | 10.21 | 160 |
| 8 | 50 | - | - | 6.3 | 10.05 | 160 |
| 9 | 5 | - | - | 5.1 | 9.04 | 160 |
| 10 | 100 | - | - | 6.5 | 10.21 | 170 |
| 11 | 50 | - | - | 6.3 | 10.05 | 170 |
| 12 | 5 | - | - | 5.1 | 9.04 | 170 |



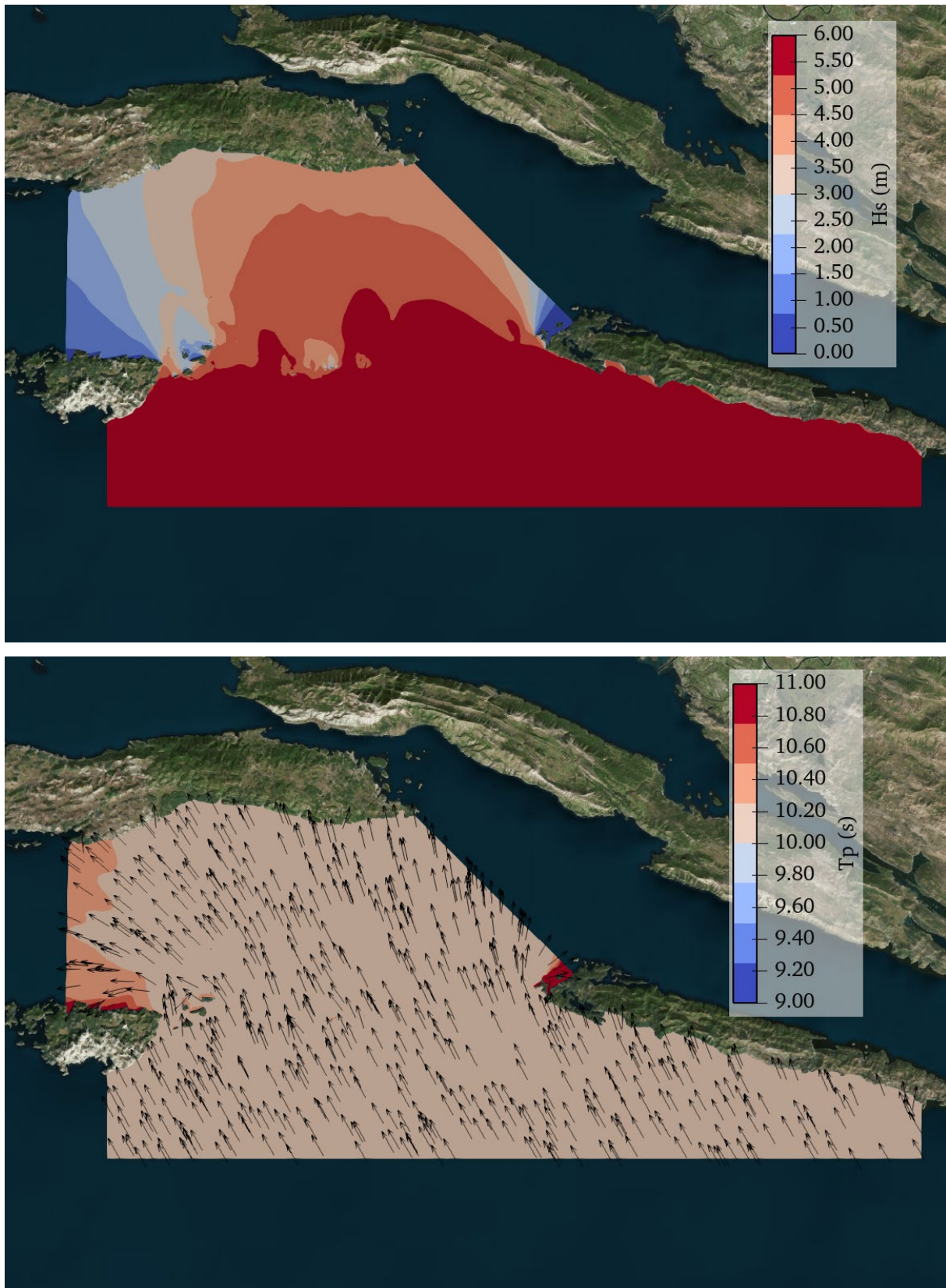
Slika 5: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 1 prema tablici simulacija (Tablica 8)



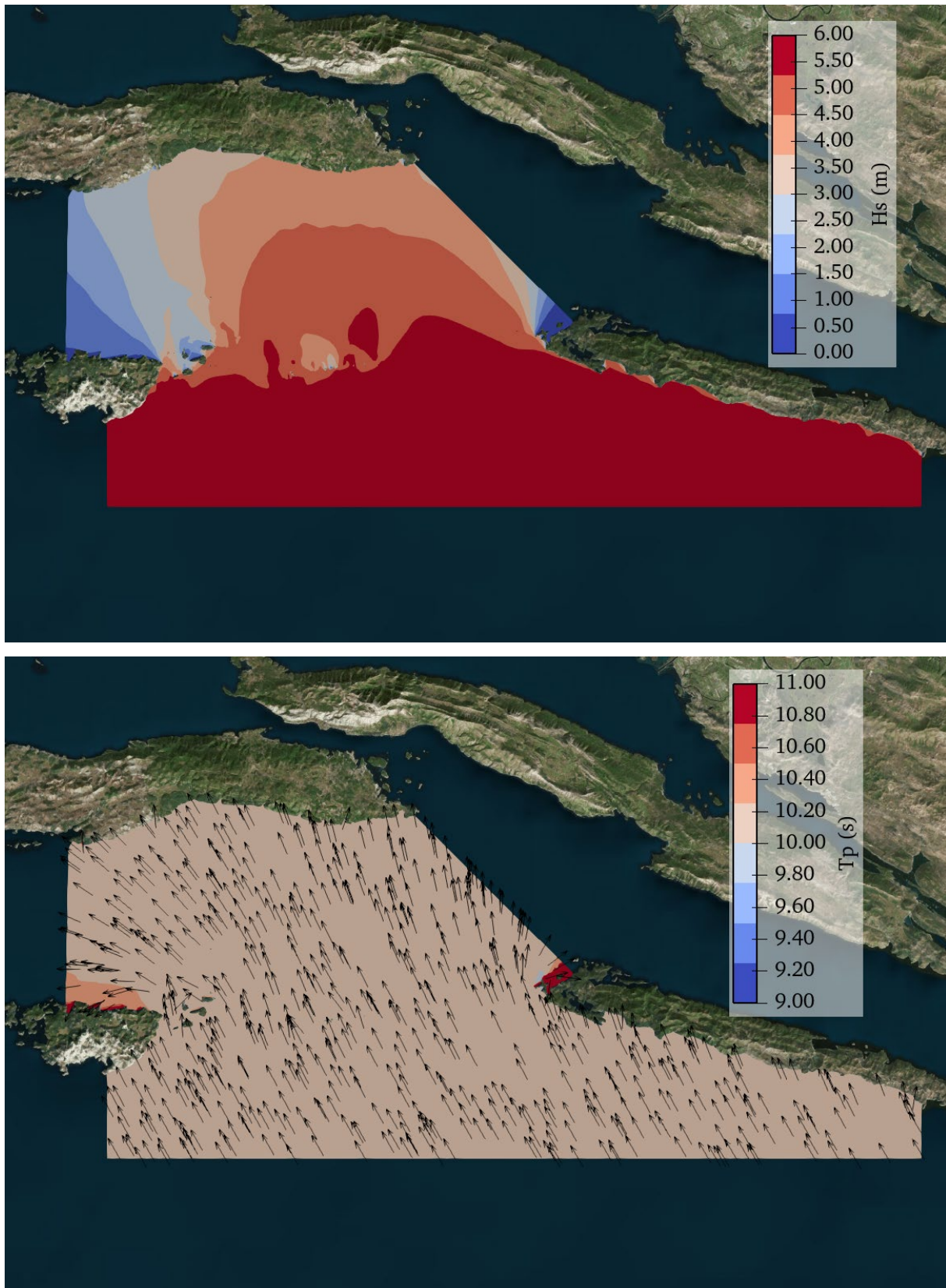
Slika 6: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 2 prema tablici simulacija (Tablica 8)



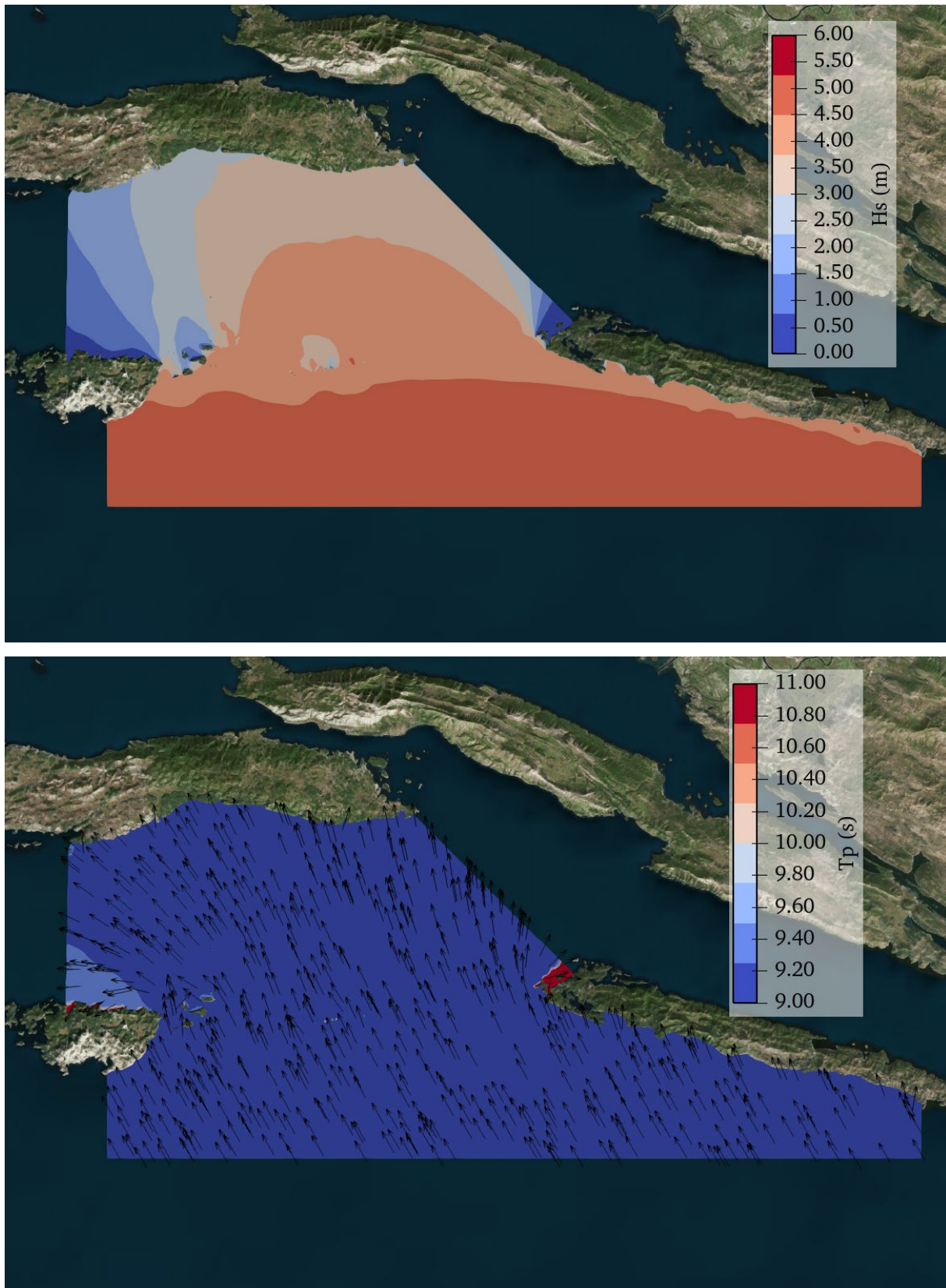
Slika 7: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 3 prema tablici simulacija (Tablica 8)



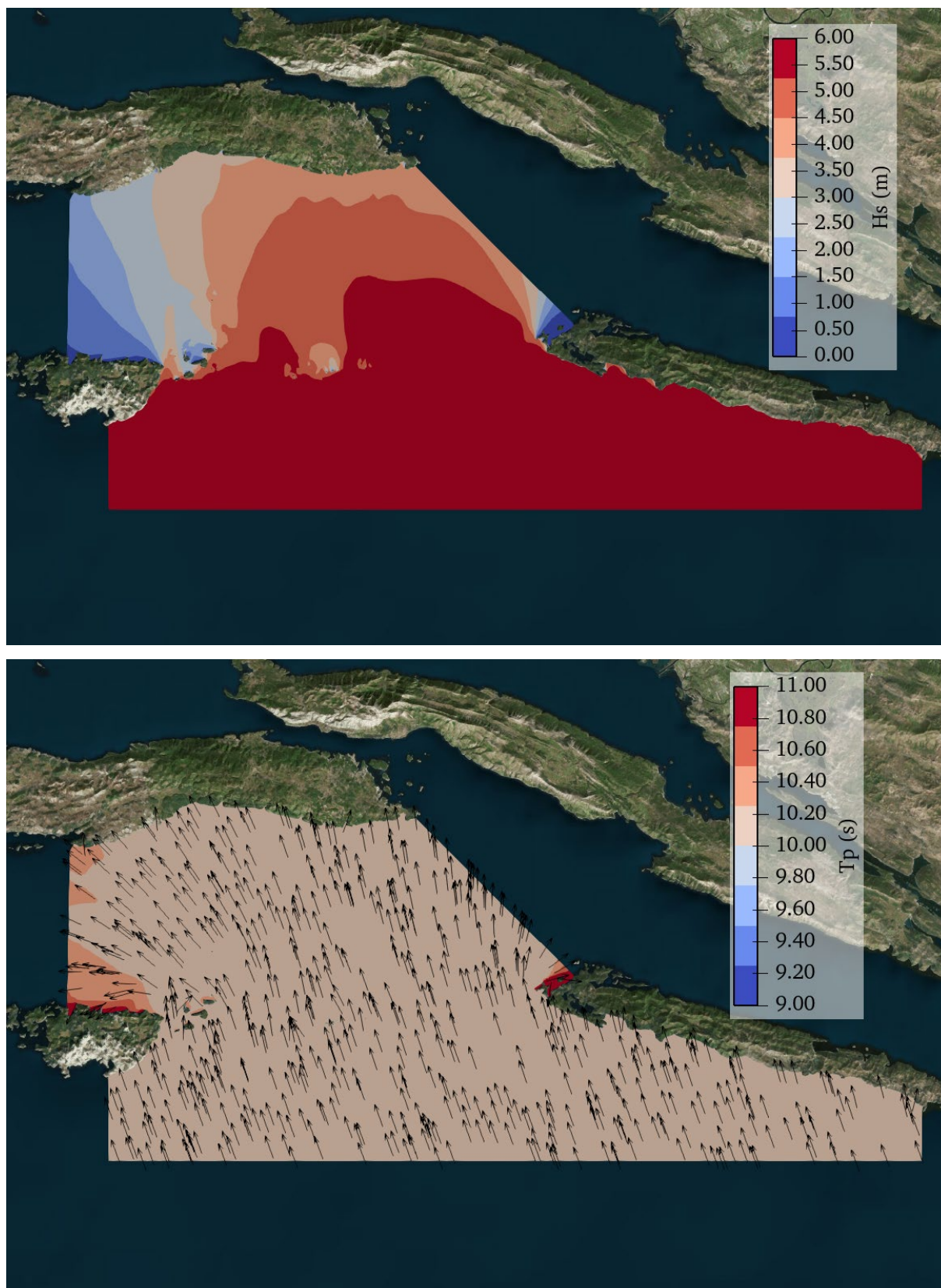
Slika 8: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 4 prema tablici simulacija (Tablica 8)



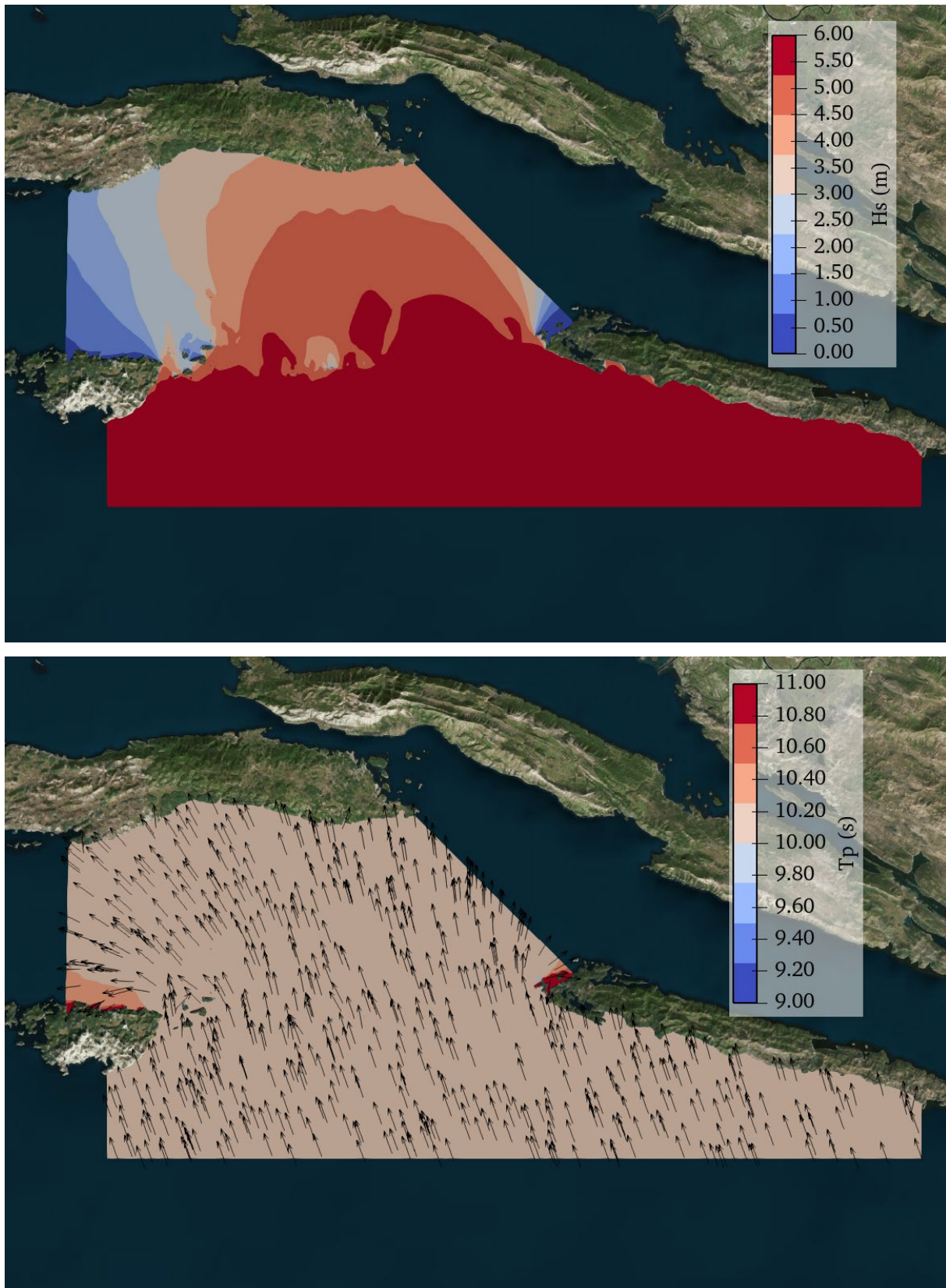
Slika 9: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 5 prema tablici simulacija (Tablica 8)



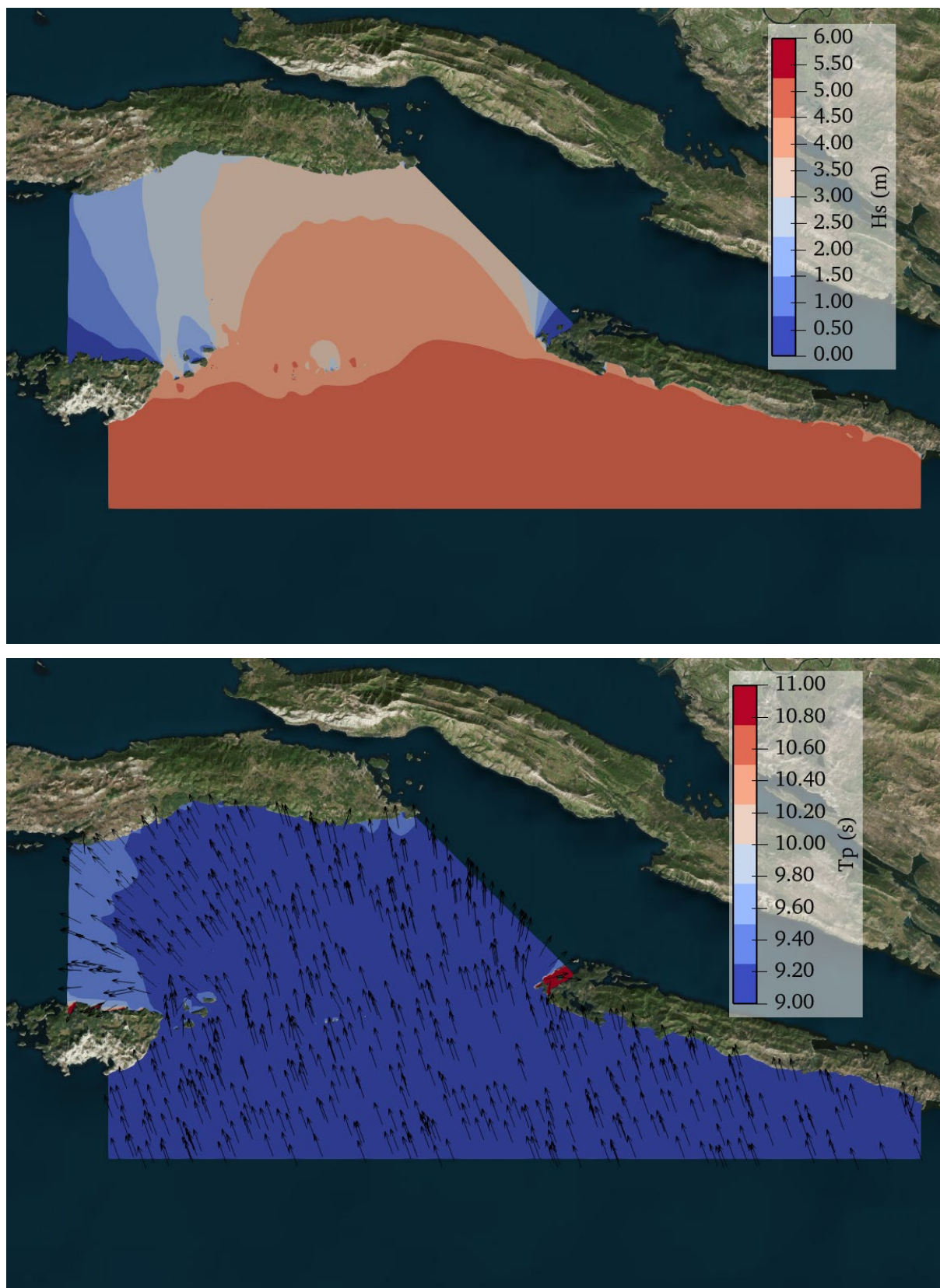
Slika 10: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 6 prema tablici simulacija (Tablica 8)



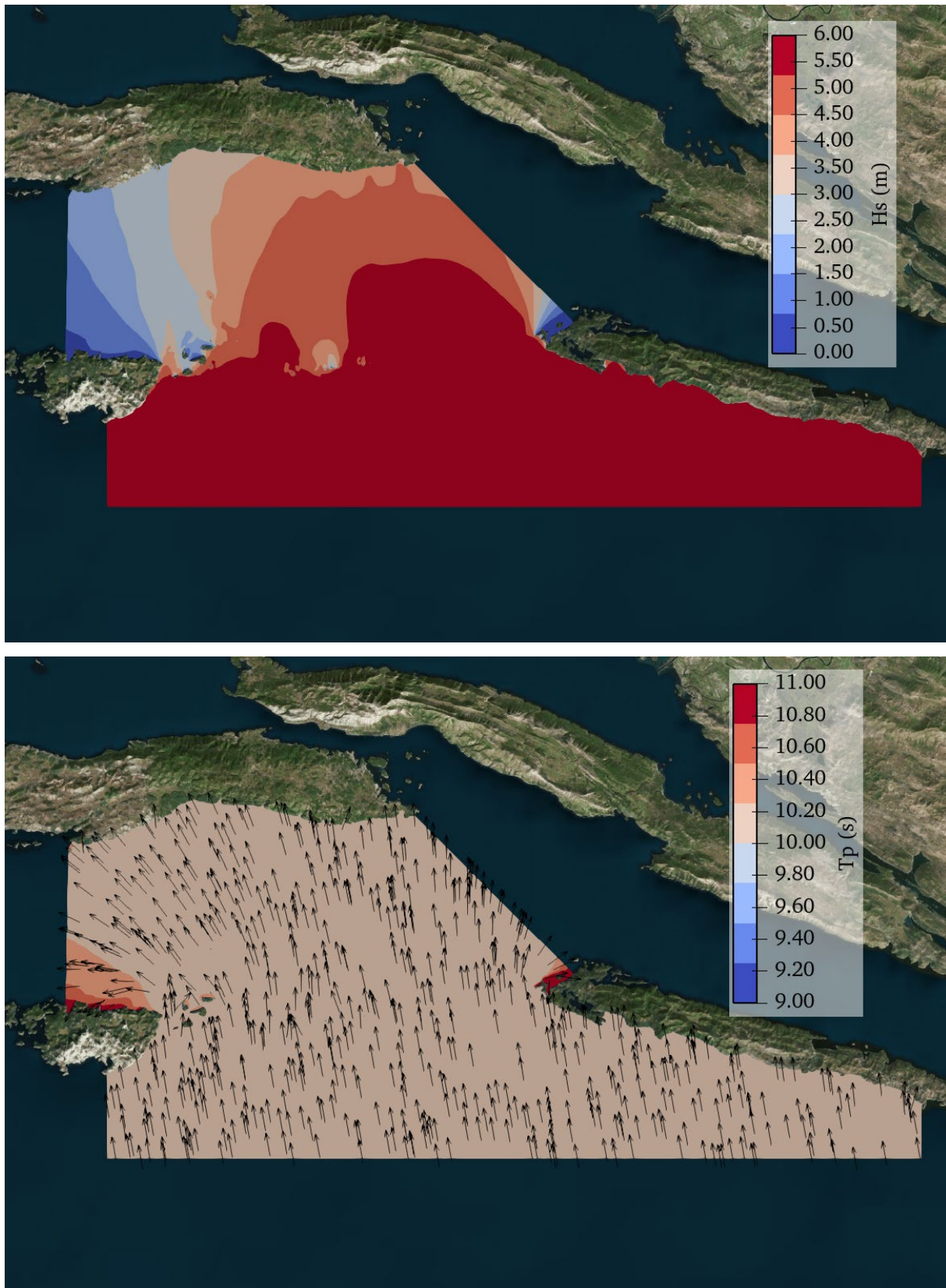
Slika 11: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 7 prema tablici simulacija (Tablica 8)



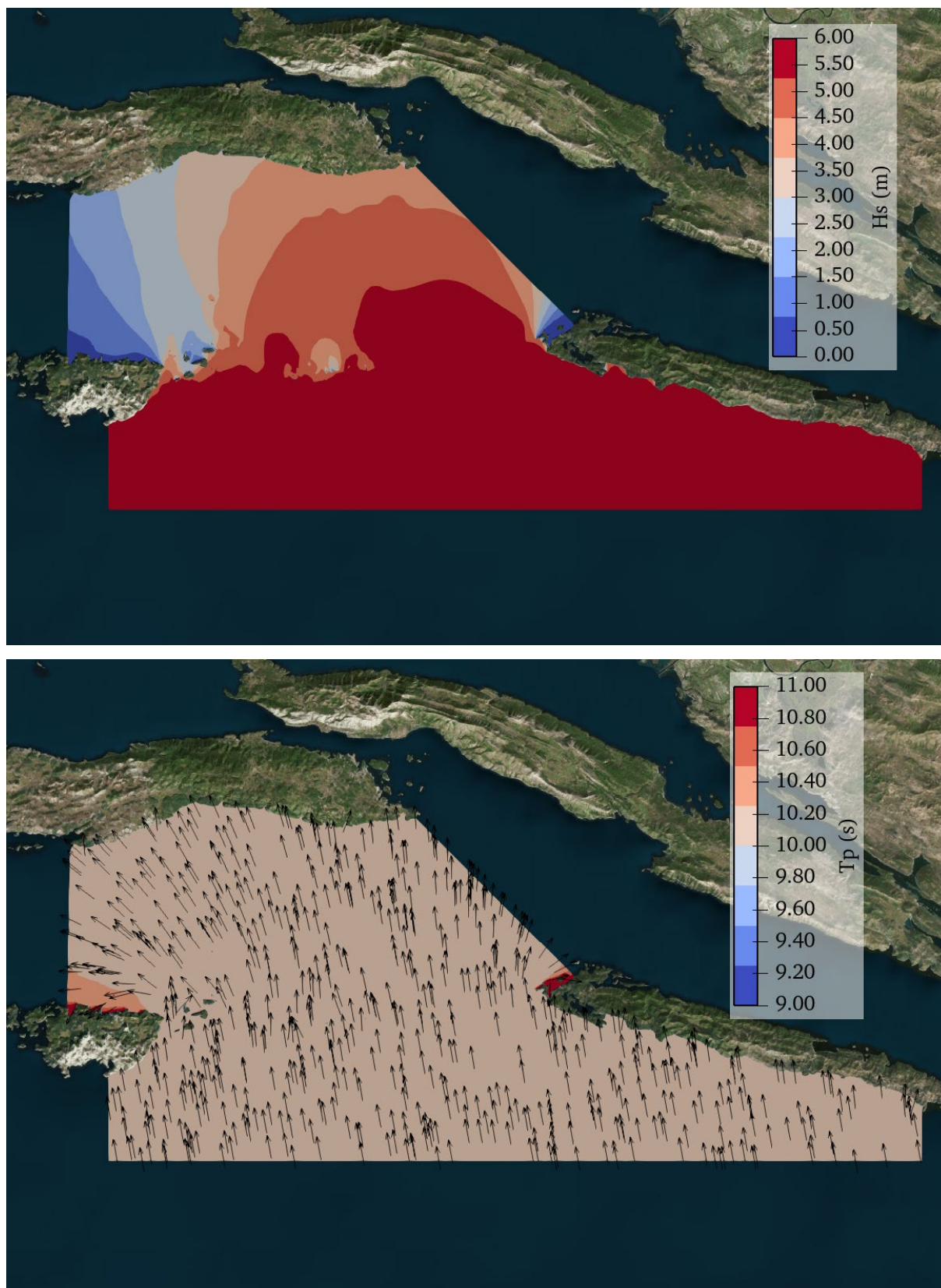
Slika 12: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 8 prema tablici simulacija (Tablica 8)



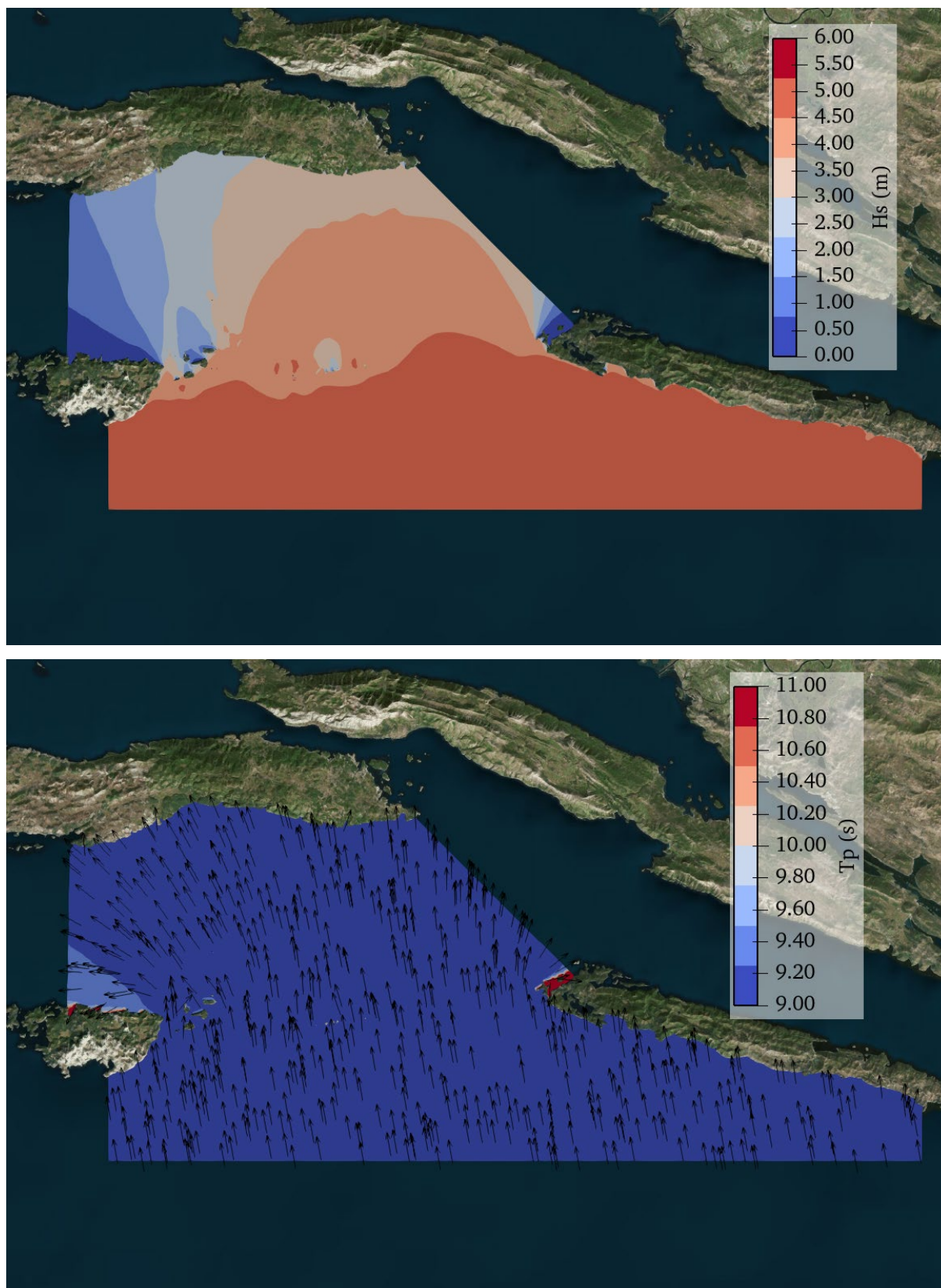
Slika 13: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 9 prema tablici simulacija (Tablica 8)



Slika 14: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 10 prema tablici simulacija (Tablica 8)



Slika 15: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 11 prema tablici simulacija (Tablica 8)



Slika 16: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 12 prema tablici simulacija (Tablica 8)

U ovom dijelu rada su sažeti rezultati numeričkog generiranja i propagacije valova koristeći rubne uvjete valova na južnoj otvorenoj granici (Tablica 8 – simulacija 1-12).

U Tablica 9 su izdvojeni rezultati koji se odnose na točku P ispred uvale Zavalatica (lokacije prikazane na Slika 3). Dok su rezultati polja značajnih valnih visina i vršnih perioda prikazani na Slika 5-Slika 12.

Maksimalni val ispred uvale Zavalatica je 3.15m za 100 godišnji povratni period. Smjer ne utječe dramatično, nego unutar 15% rezultata u većini slučaj. Trajenje valova i valna visina se ne razlikuju puno za testove istih povratnih perioda.

Tablica 9: Rezultati regionalnog numeričkog modela valnog generiranja i propagacija za lokaciju P

| Valovi ispred uvale Zavalatica | | | | |
|--------------------------------|-----|--------|--------|-------|
| N | PP | Hs (m) | Tp (s) | Smjer |
| 1 | 100 | 3.15 | 10.22 | 142 |
| 2 | 50 | 3.08 | 10.14 | 142 |
| 3 | 5 | 2.52 | 9.20 | 142 |
| 4 | 100 | 3.14 | 10.21 | 143 |
| 5 | 50 | 3.05 | 10.13 | 143 |
| 6 | 5 | 2.50 | 9.20 | 144 |
| 7 | 100 | 3.02 | 10.20 | 145 |
| 8 | 50 | 2.94 | 10.12 | 146 |
| 9 | 5 | 2.42 | 9.24 | 146 |
| 10 | 100 | 2.83 | 10.18 | 147 |
| 11 | 50 | 2.75 | 10.10 | 148 |
| 12 | 5 | 2.25 | 9.16 | 149 |

4 ZAKLJUČAK

Provedena je numerička analiza valnih deformacija u akvatoriju između otoka Korčule i Lastova, sa posebnom pažnjom na područje planiranog zahvata, ispred uvale Zavalatica. Cilj provedenih numeričkih simulacija je iznalaženje polja značajnih valnih visina, vršnih valnih perioda i incidentnih smjerova valovanja u akvatorij ispred predmetnog zahvata za povratna razdoblja od 5 i 100 godina u uvjetima kritičnih smjerova valovanja S-SW sektora (110-200 stupnjeva). Potrebno je napomenuti da je povratni period 5 godina bitan za analizu funkcionalnosti (operativnosti) luke a povratni period 100 godina za proračun stabilnosti konstrukcija. U prethodnom poglavlju dani su grafički prilozi sa prikazom polja značajnih valnih visina, polja vršnih perioda sa smjerom gibanja valova za sve provedene numeričke simulacije.

Temeljem rezultata numeričkih simulacija prepoznato je da je kritičan smjer za funkcionalnost buduće lučice Zavalatica iz smjera 140 stupnjeva, pri 5-godišnjem povratnom periodu.

Dodatno će biti potrebno provesti simulacije propagacije valova koji uključuju, osim valova na rubnom uvjetu, vjetar jer se očekuje bitan učinak na konačne valne parametre ispred uvale Zavalatica na akvatoriju ove veličine. Nadalje će trebati izraditi lokalni model agitacije unutar akvatorije planirane lučice Zavalatica. Tijekom ispitivanja valja uzeti u obzir više varijantnih rješenja tlocrtne pozicije obalnih građevine s izvedivim koeficijentima refleksije.

POPIS LITERATURE

- [1] CERC: Shore protection Manual. Vol I 2. ed. Washington D. C.: US Army Corps of Engineers - Coastal Engineering Research Center, 1984.
- [2] WMO: Handbook on Wave Analysis and Forecasting. WMO-No.446. Geneva: World Meteorological Organization, 1976. Str. 70
- [3] Bretschneider, C. L.: Revisions in Wave Forecasting. - Deep and Shallow Water. In: Proceedings of the Sixth Conference on Coastal Engineering - Council on Wave Research, New York: ASCE, 1959.
- [4] Darbyshire, M.; Draper, L.: Forecasting Wind-Generated Sea Waves. In.: Engineering (London) Nr.195 (April 1963): 482 - 484
- [5] Carević, D., Pršić, M: „Pomorske Građevine“, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2020.
- [6] Cartwright, D.C.: A Comparison of Instrumental and Visually Estimated Wave Heights and Periods Recorded on Ocean Weather Ships. In.: The presentation of wave data from voluntary observing ships, Hogben, N.; Lamb, F.E. (GB): National Physical Laboratory, SHIP REF. 49 (1964)
- [7] Pierson, W.J.; Moskowitz, L.: A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S.A. Kitaigoriskij. In.: Journal of the Geophysical Research (USA) Vol 69 (1964) No. 24: 5181-5190
- [8] ITTC: Technical Decisions and Recommendations Of the Seakeeping Comitee. In.: Proceedings 12. i 13. ITTC, 1969. Rim i 1972. Berli
- [9] Simiu, E.; Scanlan, R. H.: Wind Effects on Structures – An Imtroduction to Wind Engineering, Second edition, John Wiley / Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1986
- [10] Groen, P.; Dorrenstein, R.; Zeegolven. In.: Koninklijk Neederlands Meteorologisch Institut, Opstellen op Oceanographisch en Maritiem Meteorologisch Gebied no.11 1958
- [11] Pierson, W.J.jr.; Neumann, g.; James, R.W.: Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics. In.: Publication No 603. .Washington D.C.: US Navy Hydrographic Office, 1955
- [12] Silvester, R.: Coastal Engineering, 1. Amsterdam: Elsevir Scientific Publication Comp. 1974. –p. 256-269

- [13] Hasselaann, K.; Ross, D.B. Müller, P.; Sell, W.: A Parametric Wave Prediction Model. In.: Journal of Physical Oceanography, Vol. 6 (1976.): 200-228
- [14] [Mediterranean Sea Waves Reanalysis | Copernicus Marine Service](#)
- [15] Damjan Bujak, Goran Lončar, Dalibor Carević and Tin Kulić: „[The Feasibility of the ERA5 Forced Numerical Wave Model in Fetch-Limited Basins](#)“

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1: Domena numeričkog modela koji se koristi za proračun valnog generiranja i transformacije u prostoru..... | 11 |
| Slika 2: Prikaz batimetrije unutar diskretizirane domene | 12 |
| Slika 3: Kontrolne točke za koje se posebno izdvajaju rezultati prema provedenim simulacijama | 12 |
| Slika 4: Graf LOG-NORMALNE distribucije slučajne varijable H_s iz podataka o valovima za period od 1993.-2021. ispred Lastova za sektor (110° - 200°)..... | 16 |
| Slika 5: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 1 prema tablici simulacija (Tablica 8) | 18 |
| Slika 6: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 2 prema tablici simulacija (Tablica 8) | 19 |
| Slika 7: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 3 prema tablici simulacija (Tablica 8) | 20 |
| Slika 8: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 4 prema tablici simulacija (Tablica 8) | 21 |
| Slika 9: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 5 prema tablici simulacija (Tablica 8) | 22 |
| Slika 10: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 6 prema tablici simulacija (Tablica 8) | 23 |
| Slika 11: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 7 prema tablici simulacija (Tablica 8) | 24 |
| Slika 12: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 8 prema tablici simulacija (Tablica 8) | 25 |
| Slika 13: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 9 prema tablici simulacija (Tablica 8) | 26 |
| Slika 14: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 10 prema tablici simulacija (Tablica 8) | 27 |
| Slika 15: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 11 prema tablici simulacija (Tablica 8) | 28 |
| Slika 16: Rezultati numeričkog modela koji pokazuju polje značajnih valnih visina za simulaciju 12 prema tablici simulacija (Tablica 8) | 29 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1: Izbor projektne valne visine (Hproj) ovisno o vrsti proračuna i tipu građevine (Izvor: [3,5,6,7]) | 2 |
| Tablica 2: Primjeri preporučenih razina zaštite od prelijevanja valovima u skladu s povratnim razdobljima (Izvor: [5,8,9]) | 3 |
| Tablica 3: Orijentacijske granične valne visine za razne operacije prilikom uplovljavanja i prekrcaja brodova u luci i marini (Izvor: [5,10,11,12]) | 4 |
| Tablica 4: Preporučeni proračunski radni vijek građevine (Izvor: [2,7,13]) | 4 |
| Tablica 5: Maksimalne valne visine od 1993. do 2021. godine, i pripadajući smjer vjetra i period vala | 13 |
| Tablica 6: Razredi valnih visina od za period od 1993.-2021. ispred Korčule za sektor (67.5°-112.5°) | 14 |
| Tablica 7: Rezultati dugoročne prognoze za sektor (67.5°-112.5°) za razdoblje 1993.-2021. u proračunskoj točki P1 ispred Korčule | 15 |
| Tablica 8: Tablica planiranih testova valne transformacije unutar ovog rada..... | 17 |
| Tablica 9: Rezultati regionalnog numeričkog modela valnog generiranja i propagacija za lokaciju P | 30 |