Mjerenje pritiska površinskih valova i brzine vjetra u splitskom akvatoriju

Jurun, Branimir

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:226:721720

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of University Department of Marine Studies

SVEUČILIŠTE U SPLITU

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STUDIJE MORA

DIPLOMSKI STUDIJ MORSKO RIBARSTVO

Branimir Jurun

MJERENJE PRITISKA POVRŠINSKIH VALOVA I BRZINE VJETRA U SPLITSKOM AKVATORIJU

Diplomski rad

Split, srpanj 2018.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STUDIJE MORA

DIPLOMSKI STUDIJ MORSKO RIBARSTVO

MJERENJE PRITISKA POVRŠINSKIH VALOVA I BRZINE VJETRA U SPLITSKOM AKVATORIJU

Diplomski rad

Predmet: Oceanografija

Mentor:

Doc. dr. sc. Gordana Beg Paklar

Student:

Branimir Jurun

Split, srpanj 2018.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Splitu
Sveučilišni odjel za studije mora
Diplomski studij Morsko ribarstvo

Diplomski rad

MJERENJE PRITISKA POVRŠINSKIH VALOVA I BRZINE VJETRA U SPLITSKOM AKVATORIJU

Branimir Jurun

Sažetak

U radu je dan opis instrumenta „Quattuor 45“ i definiranje mjere pritiska morskog vala te prikaz mjerenja pritiska morskog vala i brzine vjetra na ispitivanom području. Na samom početku rada, opisano je dosadašnje opažanje morskih valova te teorijski opis valova koji se približavaju obali. U radu je imenovan instrument prema načinu dobivanja podataka te je, uz slike bokocrta i nacrta, opisan instrumenta. Isto tako, opisano je sidrište instrumenta, koje je napravljeno od dva betonska bloka, kako bi osigurali horizontalnu stabilnost instrumenta. Uz pomoć plutače na instrumentu osigurano je vertikalno praćenje vrha vala pa s horizontalnom stabilnošću i vertikalnim praćenjem vrha vala dolazimo do reprezentativnog podatka o pritisku morskog vala. Elektronički dio instrumenta se sastoji od glavnog čipa „Arduino“, memorije čipa „Arduino“, četiri mjerne ćelije s odgovarajućim modulima te senzora brzine vjetra. Nakon završenog mjerenja, bazu podataka otvaramo u programu Excel te slijedi detaljna obrada podataka. U radu je detaljno opisana mjera pritiska morskog vala izražena u mjernoj jedinici kN/m^2. Mjerenja su prikazana višestrukim linijskim grafikonom gdje je na lijevoj y osi prikazan pritisak morskog vala, a na desnoj y osi je prikazana brzina vjetra u odnosu na vrijeme mjerenja koje je prikazano na x osi.

(33 stranice, 23 slike, 2 tablice, 13 literaturnih navoda, jezik izvornika: hrvatski)

Ključne riječi: brzina vjetra, instrument „Quattuor 45“, pritiska vala, splitski akvatorij

Mentor: Doc. dr. sc. Gordana Beg Paklar

Ocjenjivači: 1. Doc. dr. sc. Jure Brčić
2. Prof. dr. sc. Branka Grbec
3. Doc. dr. sc. Gordana Beg Paklar

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Split
Department of Marine Studies
Graduate study Marine Fishery

MSc Thesis

Measurement of the wave pressure and wind speed in the Split marine area

Branimir Jurun

Abstract

In this paper the description of instrument called "Quattuor 45" and definition of wave pressure measurements are shown. Special attention is given to measurement of wave pressure created by the wind forcing and wind speed in the investigated area. The study begins with theoretical review and numerous up to date investigations related to the waves approaching the coast. Also, it shows the detailed schematic view of the instrument that is enriched with pictures from ground plan and side view. Horizontal stability of the instrument is achieved by anchorage which relies on two concrete blocks. Vertical wave peak monitoring is ensured by two floats inside the instrument and one float above the instrument. The synthesis of horizontal stability and vertical wave peak monitoring allows to create a representative data base for wave pressure measuring. Namely, the electronic part of the instrument consists of the "Arduino", its memory, four load cells with the appropriate modules and the wind speed sensor. The next part of the research is dedicated to data processing. All results from measurements are stored automatically in the data base and after that detailed processing is carried out in the MS Excel. The results of the wave pressure measurement are expressed by the measuring unit kN/m^2. This paper also gives a graphical presentation of the results by multi-line graph. The wave pressure is presented on the left vertical axis, while the wind speed is shown on the right vertical axis. The time of measurement is displayed on the horizontal axis.

(33 pages, 23 figures, 2 tables, 13 references, original in: Croatian)

Keywords: wind speed, instrument „Quattuor 45“, waves pressure, Split marine area

Supervisor: Gordana Beg Paklar, PhD / Assistant Professor

Reviewers: 1. Jure Brčić, PhD / Assistant Professor
2. Branka Grbec / Assistant Professor
3. Gordana Beg Paklar, PhD / Assistant Professor

Sadržaj

1. UVOD 1
1.1. Dosadašnja istraživanja 1
1.1.1. Opća teorija površinskih valova 1
1.1.2. Mjerenje vjetra i površinskih valova 5
1.2. Svrha i ciljevi rada 11
2. MATERIJALI I METODE 13
2.1. Metoda mjerenja brzine vjetra 13
2.2. Metoda mjerenja pritiska morskog vala 14
2.2.1. Dijelovi instrumenta „Quattuor 45“¸ 14
2.2.2. Prijenos sile iz mehaničkog dijela na elektronički dio instrumenta „Quattuor 45“ 17
2.2.3. Programiranje i obrada podataka 19
2.2.4. Mjera pritiska morskog vala 22
3. REZULTAT I RASPRAVA 25
4. ZAKLJUČCI 31
5. LITERATURA 32

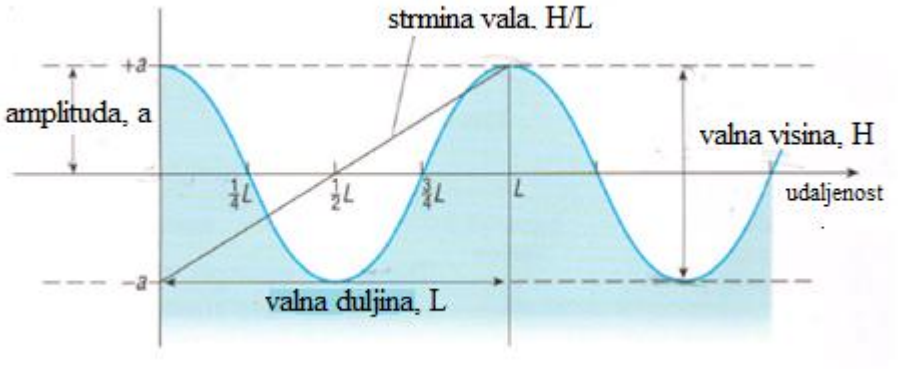
1. UVOD

1.1. Dosadašnja istraživanja

1.1.1. Opća teorija površinskih valova

Morski valovi su privukli pozornost mnogih znanstvenika kroz povijest koji su ih opisivali na razne načine. Među prvima je bio Aristotel koji je uočavao i opisivao odnos između vjetra i mora, a ova tema zaokuplja i danas znanstvenike koji se bave fizičkom oceanografijom. Iako su se valovima u moru bavili kroz povijest brojni istraživači, razumijevanje formiranja valova i načina na koji valovi putuju oceanima i morima ni danas nije kompletno. To je djelomično zbog toga što su motrenja i mjerenja karakteristika morskog vala komplicirana, a i dijelom zato što se matematički modeli ponašanja vala temelje na dinamici idealnog fluida, a morska vode ne odgovaraju tim idealima (Wright i sur., 1999).

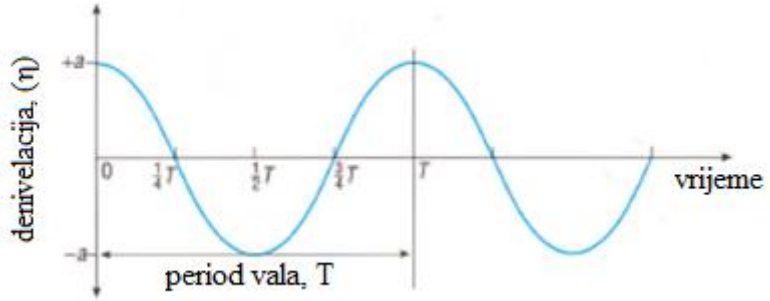
Započet ćemo s opisom morskih valova, pripadajućom terminologijom i oznakama koje se najčešće koriste za osnovne parametre valova (Slika 1).



Slika 1. Vertikalni profil dva uzastopna idealizirana morska vala koji prikazuje dimenzije valova i njihov sinusoidalni oblik (izvor: prema Wright i sur., 1999).

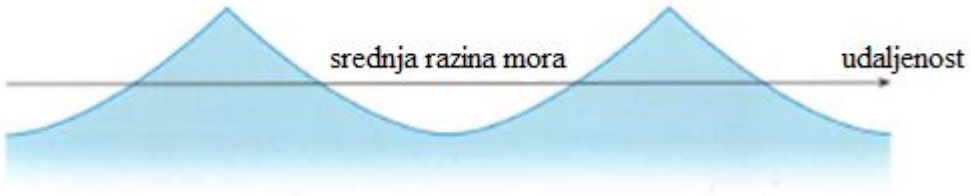
Visina vala (H) je najmanja vertikalna udaljenost između najviše (brijega) (+a) i najniže točke vala (dola) (-a). Visina vala je dvostruko veća od amplitude vala (a). Valna duljina (L) je udaljenost između dva uzastopna vrha vala (ili dva uzastopna dola vala). Strmina je definirana kao valna visina podijeljena s valnom duljinom (H/L). Vrijeme koje prođe između dva uzastopna prolaska vrha vala (ili dva uzastopna dola vala) pored fiksne točke je period (T), te se općenito mjeri u sekundama. Broj vrhova vala (ili broj dolova) koji prolaze pored fiksne točke u sekundi naziva se frekvencija (f) (Wright i sur., 1999).

Wright i sur. (1999) navode da se pojednostavljena teorija površinskih valova temelji na pretpostavci da je oblik vala sinusoidan i da se može prikazati krivuljama kao na slici 2. Ova pretpostavka nam dopušta da pomak vala od ravnotežnog položaja, ili denivelacije, (η) smatramo jednostavnim harmonijskim gibanjem tj. sinusoidnom varijacijom razine vode uzrokovanu prolaskom vala. Pomak vala u fiksnom trenutku ili na fiksnom mjestu u prostoru varira između +a (na vrhu brijega vala) i -a (na dnu dola vala). Slika 1. pokazuje kako se denivelacija vala mijenja u prostoru u jednom trenutku, dok slika 2 pokazuje kako denivelacija vala varira s vremenom u fiksnoj točki.



Slika 2. Denivelacija idealnog vala u fiksnoj točki kao funkcija vremena (izvor: prema Wright i sur., 1999).

Denivelacija je 0 tamo gdje je L=1/4L, kao i u vremenu T=1/4T (Slike 1 i 2). Obje krivulje pokazane na slikama 1 i 2 su sinusoide. Ipak, valovi u moru generirani vjetrom općenito nemaju jednostavni sinusoidalni oblik, već imaju oblik trohoide, zbog čega se takav val zove trohoidni val. Trohoida je krivulja koju opisuje točka na obodu kruga koji se giba po ravnoj podlozi (Wright i sur., 1999).



Slika 3. Profil trohoidnog vala (izvor: prema Wright i sur., 1999).

Wright i sur. (1999) tvrde da se pri valnom gibanju čestice vode pomiču iz ravnotežnog položaja te se vraćaju u njega uz pomoć povratne sile. Povratna sila uzrokuje da čestica premaši

ravnotežni položaj i pređe veći put od onoga koji bi joj bio dovoljan da se vrati u ravnotežni položaj. Takva pomicanja iz ravnotežnog položaja i vraćanja nazad uspostavljaju karakteristično oscilatorno valno gibanje koje u svom najjednostavnijem obliku ima sinusoidna obilježja.

Kod površinskih valova na vodi djeluju dvije takve povratne sile koje održavaju valno gibanje (Buljan i Zore-Armanda, 1972):

1. gravitacijska sila Zemlje,
2. površinska napetost.

Wright i sur. (1999) navode da je u slučaju valova valne duljine manje od 1,7 metara, povratna sila površinska napetost te takve valove nazivamo kapilarnim valovima, dok je kod valova valne duljine veće od 1,7 metra, glavna povratna sila gravitacija te takve valove nazivamo gravitacijskim valovima.

Wright i sur. (1999) opisuju da gravitacijski valovi nastali između dva sloja mora različite gustoće nazivamo unutarnjim valovima. Oni nastaju obično na mjestima gdje je veliki porast gustoće mora s dubinom tj. strm gradijent gustoće tzv. piknoklina. Piknoklina je povezana s naglom promjenom temperature i saliniteta s dubinom, koji zajedno određuju promjene gustoće mora.

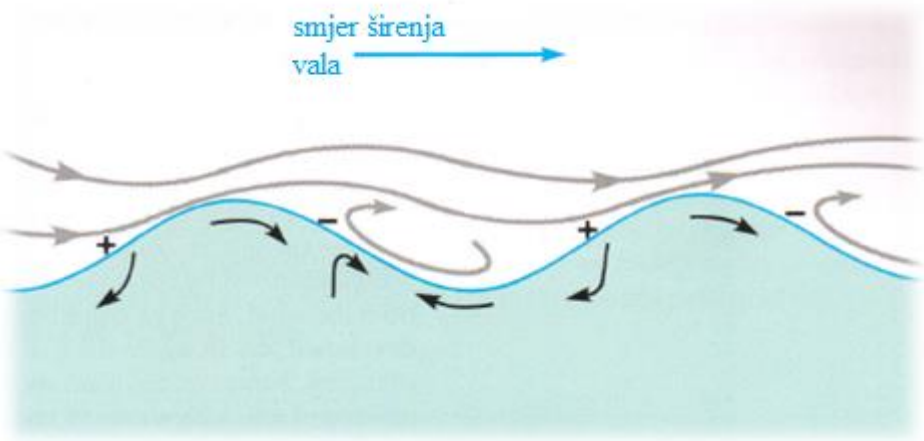
Kako je razlika u gustoći između dva sloja mora mnogo manja nego ona između vode i zraka, potrebno je manje energije da se čestica mora pomakne iz ravnotežnog položaja te se unutrašnje oscilacije uspostavljaju puno lakše nego površinske. Unutarnji valovi putuju sporije od većine površinskih valova. Imaju uglavnom veće amplitude od površinskih valova, duže periode (sate i minute umjesto sekunda) te duže valne duljine (prije stotine nego desetine metara). Unutarnji valovi važni su u kontekstu vertikalnih procesa miješanja (Wright i sur., 1999).

Benjamin Franklin je 1774. godine rekao: „Zrak u pokretu, vjetar, prilikom prolaska preko mirne površine vode, može vršiti trenje na vodenu površinu i stvoriti nabore koji su, u slučaju da se to nastavi, elementi budućeg vala“ (Wright i sur., 1999).

Drugim riječima, trenjem dva fluida različitih brzina dolazi do prijenosa impulsa i energije. Na površini mora, većina energije vjetra rezultira valovima, a mali dio se prenosi na stvaranje vjetra neposredno iznad površine mora (Wright i sur., 1999).

Harold Jeffreys je 1929. godine ustanovio da valovi dobivaju energiju iz vjetra zbog razlika u tlaku uzrokovanih zaklanjajućim učinkom vrhova valova (Wright i sur., 1999).

Stražnja strana vala u koju vjetar puše trpi veći pritisak od prednje koja je zaklonjena od te sile vjetra (Slika 4). Ispred svakog vala formiraju se zračni vrtlozi, što dovodi do razlika u tlaku (plusevi i minusi na slici 4) i te razlike tlaka guraju val prema naprijed.



Slika 4. Jeffereyev model stvaranja vala. Zakrivljene sive linije označavaju strujanje zraka, a kraće crne strelice kretanje vode (izvor: prema Wright i sur., 1999).

Iako Jeffereyeva hipoteza ne objašnjava nastajanje vrlo malih valova, prema Wright i sur. (1999) hipoteza funkcionira ako:

1. brzina vjetra premašuje brzinu vala,
2. brzina vjetra premašuje 1m/s,
3. su valovi dovoljno strmi da se ostvari zaklanjajući učinak.

Empirijski se može dokazati da je zaklanjajući učinak maksimalan kad brzina vjetra tri puta premašuje brzinu vala.

Što je veći omjer brzine vjetra i brzine vala, to je val strmiji. U otvorenom oceanu, vjetar uzrokuje strminu (H/L) od oko 0,03 do 0,06. Međutim, brzina vala u dubljim vodama nije povezana sa strminom vala, nego s valnom duljinom. Što je veća valna duljina, val putuje brže (Wright i sur., 1999).

Razmatramo na koji način iz mirnog područja površine mora dolazi do stvaranja malih i strmih valova te naposljetku do stvaranja površinskih valova. Dok brzina vjetra ne premaši 1 m/s ne dolazi do značajnog porasta dimenzija valova. Kako se brzina vjetra povećava, formiraju se mali strmi valovi. Čak i nakon što je vjetar dosegao konstantnu snagu, valovi nastavljaju ubrzano rasti sve dok ne dostignu veličinu i valnu duljinu koja odgovara toj brzini vjetra. Nakon što dosegnu te dimenzije i dalje im se povećava valna duljina i period, ali znatno sporije. Moglo bi se očekivati da će se rast vala nastaviti dok se brzina vala ne izjednači s brzinom vjetra, ali u

praksi rast vala prestaje za vrijednosti brzine vala koje su manje od brzine vjetra (Wright i sur., 1999).

To se događa iz sljedećih razloga (Wright i sur., 1999):

1. dio energije vjetra se prenosi na površinu mora i stvara površinske struje,
2. dio energije vjetra se troši trenjem i pretvara u toplinu i zvuk,
3. energija se gubi kod većih valova kao rezultat loma na vrhu vala jer ga gura vjetar koji je brži od vala. Većina energije koja se potroši takvim lomom se pretvara u impuls vode prema naprijed, pojačavajući površinsku struju.

1.1.2. Mjerenje vjetra i površinskih valova

Kroz povijest pa tako i danas se monitoringom vrši opažanje te različitim mjernim instrumentima mjeri brzina vjetra. Opažanje i mjerenje brzine vjetra možemo podijeliti u tri osnovne skupine:

1. opažanje vjetra pomoću informacija iz Beaufortove skale,
2. direktno mjerenje brzine vjetra,
3. satelitsko mjerenje brzine vjetra.

Opažanja pomoću Beaufortove skale su daleko najčešći izvor podataka o vjetru. Na primjer, 90-tih godina 60% službenih opažanja vjetra iz sjevernog dijela Atlantskog oceana su dobivena opažanjima temeljenim na Beaufortovoj skali. Skala se temelji na opažanju jačine vjetra koja puše nad određenoj površini mora, gdje uzrokuje razne promjene na površini mora. Na primjer, učinci vjetra na površini mora su visina i oblik vala te pokrivenost pjenom koju vidi promatrač na brodu ili na kopnu (Stewart, 2008).

Skalu je uveo admiral Sir F. Beaufort 1806. godine kako bi odredio silu vjetra na jedrima broda**.** Skalu je prihvatio Britanski admiralitet 1838. godine i ubrzo je prešla u opću primjenu.

Stewart (2008) navodi da je Međunarodni meteorološki odbor prihvatio skalu za međunarodnu upotrebu 1874. godine. Skala je prepravljena 1946. godine kako bi se vrijednosti u Beaufortovoj skali mogli određivati pri većim brzinama vjetra te da bi vjetar u skali odgovarao na onome na 10 m nadmorske visine. Veza brzine vjetra i Beaufortove skale je

$$U_{10} = 0{,}836B^{3/2} \qquad (1)$$

gdje je B Beaufortov broj, a U_{10} je brzina vjetra izražena u m/s na nadmorskoj visini od 10 metara.

Kent i Taylor (1997) su usporedili različite revizije Beaufortove skale s brodskim mjerenjima vjetra pri kojima su anemometri bili na poznatim visinama. Njihove preporučene vrijednosti uključene u Beaufortovu skalu prikazane su u Tablici 1.

Tablica 1. Beaufortova skala vjetra.

Beaufortov broj	Opis vjetra	Brzina vjetra Čvorova	Brzina vjetra m/s	Stanje površine mora	Signifikantna visina vala, $H_{1/3}$ (m)
0	Mirno	<1	0,0-0,2	More kao zrcalo	0
1	Vjetrić	1-3	0,3-1,5	Maleni nabori na vodi, nema pjene na valovima	0,1-0,2
2	Mali povjetarac	4-6	1,6-3,3	Maleni valići, vrhovi valova	0,3-0,5
3	Nježni povjetarac	7-10	3,4-5,4	Veći valići, lome se vrhovi valova	0,6-1,0
4	Umjereni povjetarac	11-16	5,5-7,9	Mali valovi, postaju duži	1,5
5	Svježi povjetarac	17-21	8,0-10,7	Umjereni valovi i naznake prskanja	2,0
6	Jaki povjetarac	22-27	10,8-13,8	Veći valovi se stvaraju, pjenušavi vrhovi valova prskaju	3,5
7	Manji vjetar	28-33	13,9-17,1	More se nagomilava, bijela pjena se vidi u tragovima lomljenja valova, vidi se vodena prašina na moru	5,0

8	Vjetar	34-40 17,2-20,7	Umjereno veći valovi veće duljine, rubovi vrhova valova se lome u vodenu prašinu, vidi se pjena	7,5
9	Jači vjetar	41-47 20,8-24,4	Visoki valovi, gusti tragovi morske pjene, more se počinje valjati	9,5
10	Oluja	48-55 24,5-28,4	Vrlo visoki valovi s vrhovima valova koji se lome, morska površina se bijeli, more uzburkano, slaba vidljivost	12,0
11	Jaka oluja	56-64 28,5-32,7	Eksponencijalno visoki valovi, manji brodovi se gube u pogledu između valova, vidljivost još više smanjena	15,0
12	Uragan	>64 >32-7	Zrak pun morske pjene i prskanja mora, more kompletno zabijeljeno, vidljivost drastično smanjena	>15

Američka nacionalna uprava za atmosferu i oceanografiju (National Atmospheric and Oceanic Administration, NOAA) je sakupila, izdala i digitalizirala milijune opažanja valova tijekom ovog stoljeća. Tako je nastao skup podataka COADS (International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) o oceanima i atmosferi koji se uvelike koristi za proučavanje atmosferskog djelovanja na oceane (Stewart, 2008).

Liu (2002) navodi da se opažanja vjetra nad morem danas najčešće provode skaterometrom na satelitima. Skaterometar je instrument, vrlo sličan radaru, koji mjeri raspršenje radio valova malih valnih duljina koji se odbijaju od površinskih valova na oceanu.

Skaterometar mjeri brzinu vjetra s točnošću ± 1,3 m/s, greška u smjeru vjetra je ± 17°, uz prostornu rezoluciju od 25 km.

Specijalni mikrovalni senzor (Special Sensor Microwave - SSM/I) je još jedan satelitski instrument koji mjeri brzinu vjetra, a koristi se od 1987. godine na satelitima meteorološkog satelitskog programa američkog ministarstva obrane. Instrument mjeri mikrovalno zračenje koje emitira površina mora pod kutom od 60°. Emisija je funkcija brzine vjetra, vodene pare u atmosferi i količine vode u oblačnim kapljicama. Podaci s instrumenta se koriste za izračunavanje površinske brzine vjetra. Vjetrovi mjereni sa SSM/I-om imaju točnost ± 2 m/s. U kombinaciji s analizama vjetra na 1000 milibarskoj plohi Europskog centra za srednjoročnu prognozu (ECMWF), smjer vjetra se može izračunati s točnošću ± 22° (Atlas i sur., 1993).

Brzina vjetra nad morem se direktno mjeri pomoći anemometara. Takva mjerenja se provode s brodova koji daju podatke o brzini vjetra s različitih lokacija duž brodskih ruta. Direktna mjerenja se vrše i s meteoroloških plutača koje prikazuju podatke o brzini vjetra sa stalnih lokacija.

Stewart (2008) opisuje da motritelji s broda šalju podatke s anemometara kako bi nadopunili podatke o brzini vjetra s meteoroloških postaja. Anemometar se očitava četiri puta dnevno u standardnim meteorološkim terminima i podaci se šalju meteorološkoj službi. Svi brodovi koji imaju anemometre teoretski mogu sudjelovati u prikupljanju podataka, ali u programu sudjeluju oni brodovi koji imaju ispravno kalibrirane anemometre. Na takvim brodovima meteorolozi u lukama provjeravaju instrumente i zamjenjuju ih ako je potrebno. Točnost mjerenja vjetra na brodovima je oko ± 2 m/s.

Anemometri na meteorološkim plutačama daju najtočnija mjerenja vjetrova na moru. S obzirom da su plutače usidrene na otvorenom moru gdje ne postoji zaklanjajući efekt okolnih zgrada, stabala i sličnih objekata, anemometri su idealno kalibrirani te šalju najtočnije podatke o brzini vjetra. Nažalost, postoji mali broj takvih plutača. Neke daju podatke iz udaljenih područja koja rijetko posjećuju brodovi, no većina se uglavnom nalazi u obalnim područjima. Pogreška anemometara na plutačama je ±1 m/s i ±10◦ za smjer vjetra (Beardsley i sur., 1997).

Direktna mjerenja površinskih valova se vrše pomoću akcelerometara, valomjera tipa Datawell i Kelvin-Hughes, obalnih radara, sintetičkih satelitskih radara i satelitskih visinomjera.

Karakteristične veličine koje definiraju svojstva površinskih valova uzrokovanih vjetrom jesu značajna visina vala, period i smjer širenja vala. Instrument kojim se obavljaju mjerenja valnih karakteristika je valomjer ili ondograf (Slika 5). Valomjer tipa Datawell se sastoji od plutače na kojoj se nalazi odašiljač, s kojega se mjereni signal odašilja na prijemnik

odnosno registrator. Plutača se sidri na mjestu gdje želimo mjeriti valne karakteristike, dok se prijemnik nalazi obično na kopnu. Unutar plutače postavljen je vertikalni akcelerometar, koji mjeri ubrzanje nastalo zbog vertikalnog pomaka plutače. Ovakav sustav mjeri valnu visinu i period, dok se smjer napredovanja valova može odrediti ako plutača posjeduje tri ortogonalna akcelerometra.

Slika 5. Mjerna plutača s odašiljačem i prijemna stanica valomjera tvrtke DATAWELL (izvor: Mala Internet škola oceanografije 2018. Mjerenja površinskih valova. Dostupno sa: http://skola.gfz.hr/m5.htm, pristupljeno: svibanj 2018. godine).

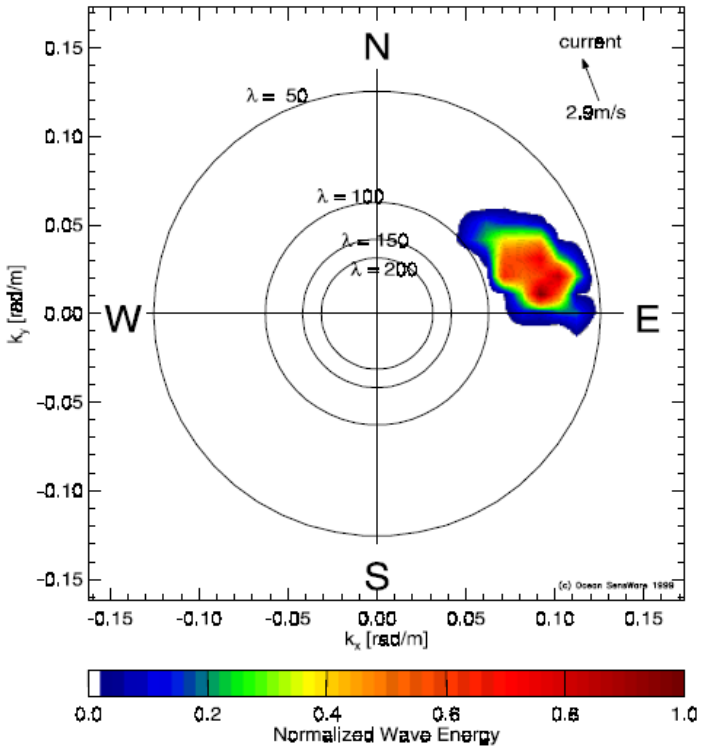
Valomjer Kelvin-Hughes pomoću ultrazvučnog oscilatora mjeri visinu površinskog vala. Instrument se sastoji od ultrazvučnog oscilatora, podvodnog kabela i kopnenog dijela. Ultrazvučni oscilator smješten je na poznatoj dubini. Kopneni dio se sastoji od pretvarača i registratora. Električni impuls prenosi se podvodnim kabelom od pretvarača do oscilatora. Oscilator pretvara električni u ultrazvučni impuls koji je u obliku simetričnog snopa usmjeren prema površini. Dolaskom do površine, dio impulsa se reflektira i vraća se istim putem do oscilatora, gdje se ponovo vraća u električni signal. Signal putuje podvodnim kabelom nazad do pretvarača i modulira se. Pojačani impuls vodi se do pisaljke koja ispisuje vrijednosti iz kojih se mogu odrediti vremenski nizovi visine površinskog vala. S poznatom dubinom mora s koje se odašilje ultrazvučni signal i dobivenim vremenom putovanja ultrazvučnog impulsa izračunavamo visinu površinskog vala.

Prema Stewartu (2008) satelitski altimetri čija mjerenja služe za određivanje površinskih geostrofičkih struja također mjere i visinu vala. Podaci dobiveni altimetrom su se koristili za dobivanje mjesečnih prosjeka visine vala. Altimetar radi na sljedeći način: radio

signal sa satelitskog altimetra se prvo reflektira od brijega vala, a zatim od dola vala. Utvrđujući vrijednosti visine brijega i dola, izračunava se visina vala. Točnost je ± 10 %.

Sintetički satelitski radar (SAR) ima na morskoj površini prostornu rezoluciju od 6 do 25 metara. Premda SAR mape ne daju jasne podatke o površinskim valovima svih valnih duljina, ovi instrumenti osobito su pogodni za prikupljanje informacija o prostornoj razdiobi smjerova širenja valova u plitkoj vodi (Stewart, 2008).

Vogelzang i sur. (2000) opisuju da se monitoring morskih valove, između ostalog, odvija i pomoću mobilnih radara. Takvo mjerenje je provedeno u Pettenu između 20. listopada i 10. studenog 1999. Slika 6 prikazuje dvodimenzionalni spektar snage vala snimljen u Pattenu korištenjem mobilnog radara. Spektar pokazuje sustav valova generiran lokalnim vjetrovima koji pušu uz izmjene smjera od zapada do jugozapada. Dobivena najviša frekvencija od 0,14 Hz i smjer od 80° odgovara valovima s periodom od oko 7 s i valnom duljinom od oko 60 m koji se šire prema sjeveroistoku.

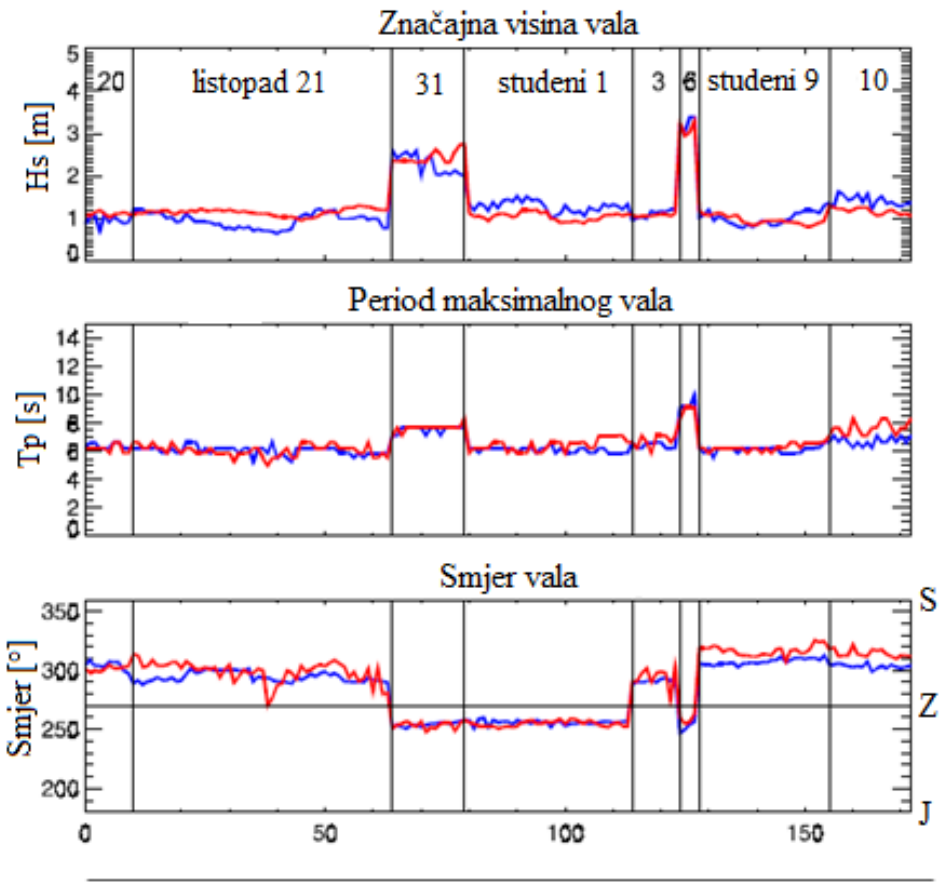


Slika 6. Dvodimenzionalni spektar valne snage snimljen mobilnim radarom u Pettenu 31.10.1999 u 8:38. Spektar je normaliziran na 1 da bi pokrio punu ljestvicu boja. (izvor: prema Vogelzang i sur., 2000).

Dvodimenzionalni spektar vala daje najkompletniji opis valnog polja jer je tako moguće razdvojiti sustave valova koji dolaze iz različitih smjerova. Sve ostale karakteristike vala, kao

što su spektar frekvencija, valni period i smjer valova, može se lakoćom odrediti iz takvog spektra. Slika 7 pokazuje glavne parametre koji karakteriziraju stanje mora: značajna visina vala (H_S), period maksimalnog vala (T_P) i njegov smjer (Vogelzang i sur., 2000).

Zanimljivo je ukazati da je plutača zakazala tijekom snažne oluje 6. studenog, vjerojatno zbog ekstremnog stanja mora (Vogelzang i sur., 2000).



Slika 7. Značajna valna visina (H_S), period maksimalnog vala (T_P) i smjer vala izmjeren u Pettenu mobilnim radarom (plava linije) i valomjerom (crvene linije). (izvor: prema Vogelzang i sur., 2000).

1.2. Svrha i ciljevi rada

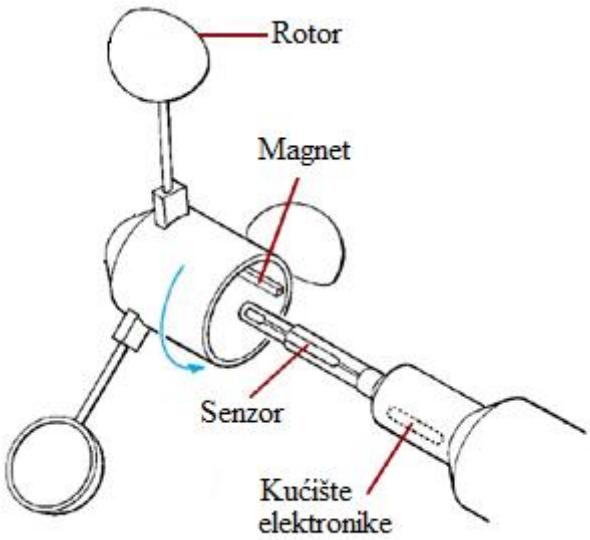
Fokus ovoga rada je mjerenje pritiska morskog vala i brzine vjetra u splitskom akvatoriju, na plaži Duilovo. Mjerenje se provelo novoizrađenim i projektiranim instrumentom „Quattuor 45“. U radu su detaljno opisani svi dijelovi instrumenta „Quattuor 45“ te je isto tako opisan način rada i memoriranje sile površinskih valova. Opisano je kako je programiran instrument te na koji način se obrađuju dobiveni podaci. Posebna pažnja je usmjerena na definiranje mjere

pritiska vala u mjernoj jedinici iz SI sustava kN/m^2. Naziv instrumenta „Quattuor 45“ potječe od metode mjerenja pri kojoj se koriste četiri mjerne ćelije koje se nalaze pod kutom od 45°. Iznad instrumenta ugrađen je senzor brzine vjetra (anemometar). S takvom kombinacijom senzora, instrument direktno mjeri pritisak morskog vala i brzinu vjetra na istom području. Rezultat mjerenja instrumentom „Quattuor 45“ jest kontinuirani vremenski niz pritiska morskog vala, izražen u kN/m^2, i brzine vjetra, izražene u km/h. Dobiveni podaci se mogu upotrijebiti za nadzor morskih valova na određenom području u realnom vremenu. Na primjer, firma za uslugu nautičkog prijevoza prije isplovljivanja broda može očitati nautičke parametre bitne za pristajanje broda (udar morskih valova i brzina vjetra) u luci u koju namjerava uploviti. Također, marinama takav sustav podataka uvelike može podići kvalitetu usluge jer skiperima mogu slati podatke o udaru morskih valova i vjetra na području marine u koju namjeravaju pristati. S obzirom na mogućnost istovremenog mjerenja brzine vjetra i pritiska morskog vala, s dužim monitoringom takvih podataka može se napraviti model koji opisuje promjene pritiska morskog vala u ovisnosti o smjeru i brzini vjetra te se s prognozom smjera i brzine vjetra može prognozirati pritisak morskog vala na određenom području. Cilj rada je mjerenje pritiska površinskih valova i brzine vjetra te prikaz dobivenih vrijednosti s instrumentom „Quattuor 45“ na plaži „Duilovo“. Takvim mjerenjima se može stvoriti šira baza prostornih podataka za obalno područje. U radu je opisana metoda mjerenja površinskih valova koja se još nije primjenjivala u fizičkoj oceanografiji, a može biti korisna u mnogim znanstvenim istraživanjima i praktičnim primjenama.

2. MATERIJALI I METODE

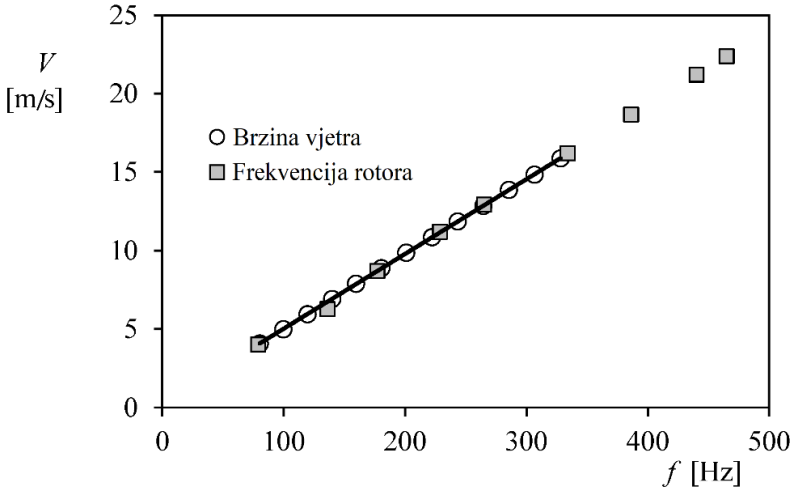
2.1. Metoda mjerenja brzine vjetra

U ovom radu za određivanje brzine vjetra koristio se anemometar. Anemometar se sastoji od: rotora, magneta, senzora i elektronike koja je smještena u adekvatnom kućištu (Slika 8). Anemometar radi na način da vjetar direktno djeluje na rotor te se rotor okreće oko svoje osi. Rotor se nalazi na fiksiranom centru anemometra gdje se i nalazi senzor. Senzor je napravljen od željeznog materijala te je okrenut prema jednoj polovici rotora. Na rotoru je pričvršćeni mali magnet. Kada se magnet pod utjecajem vjetra rotira do druge polovice valjka, željezni senzor se magnetizira te se zabilježi informaciju o jednom okretaju rotora oko svoje osi (Bohuslavek, 2010).



Slika 8. Shematski prikaz anemometra (izvor: Peet Bros. 2018. Anemometer. Dostupno sa: http://www.peetbros.com/shop/custom.aspx?recid=17 , pristupljeno: svibanj 2018. godine)

Elektronički dio anemometra se prije upotrebe kalibrira kako bi dobiveni podatak o brzini vjetra bio reprezentativan. Kalibracija je napravljena uz pomoć preciznog anemometra koji na sebi ima displej gdje u svakom trenutku prikazuje brzinu vjetra. Izvodila se u zatvorenoj prostoriji te je izazvano jedno strujanje zraka. Oba anemometra su postavljena na istoj udaljenosti i na istoj visini od izvora strujanja zraka kako bi utjecaj bio jednak. Kod preciznog anemometra s displejom zapisana je brzina strujanja zraka, a kod novog anemometra je zapisana frekvencija rotora. Postupak je ponovljen 6 puta s povećanjem izvora strujanja zraka (Slika 9.).

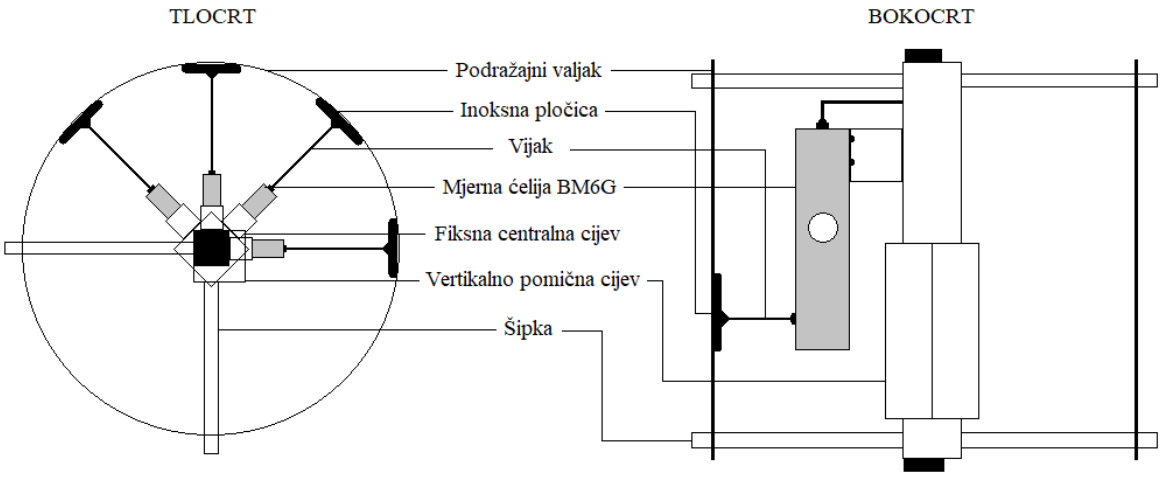


Slika 9. Kalibracijska krivulja anemometra.

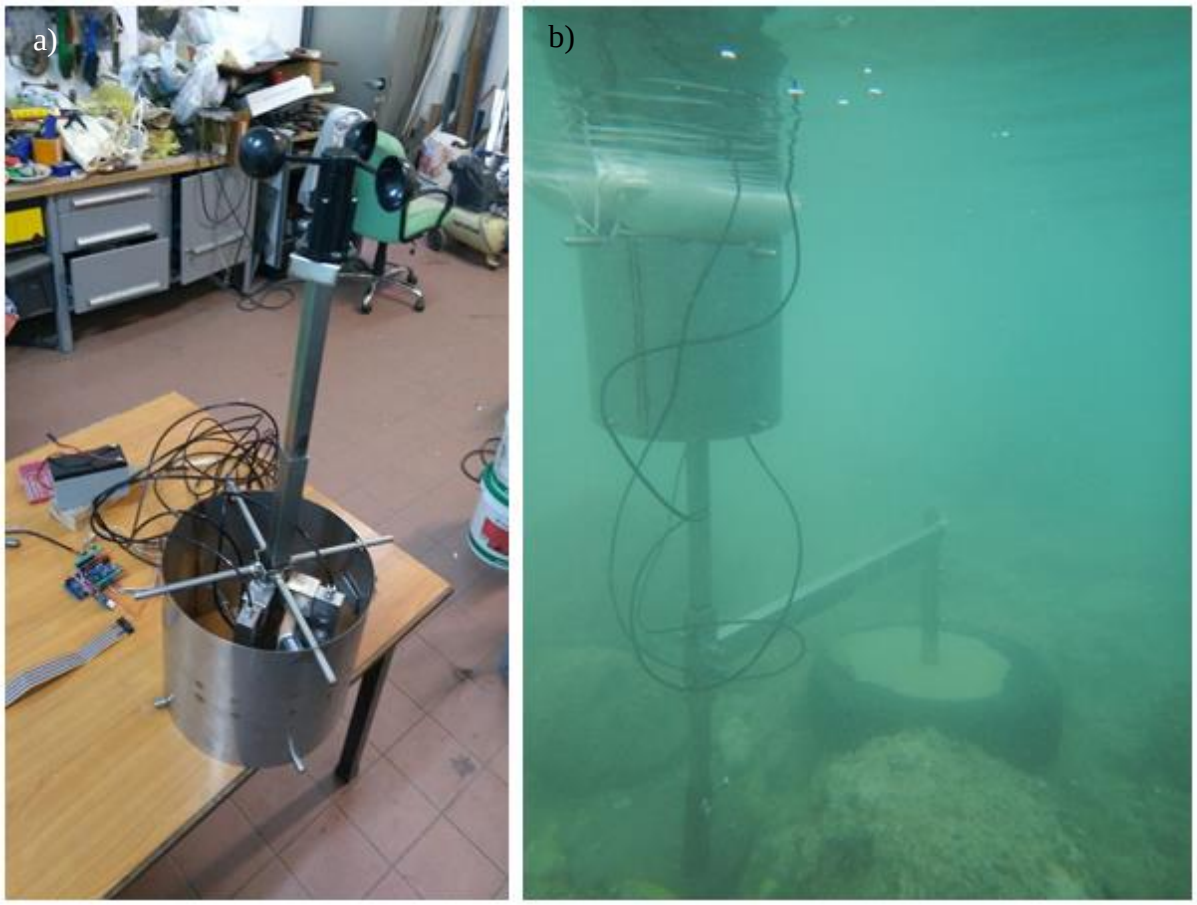
2.2. Metoda mjerenja pritiska morskog vala

2.2.1. Dijelovi instrumenta „Quattuor 45“¸

U toku mjerenja svi dijelovi instrumenta su uronjeni u more. Instrument je izgrađen od nehrđajućeg čelika. Vanjski dio instrumenta je u obliku valjka te predstavlja podražajnu plohu instrumenta gdje direktno djeluju morski valovi (Slika 10). Instrument se sastoji od fiksne centralne cijevi koja osigurava horizontalnu stabilnost instrumenta pri djelovanju morskih valova. Kroz fiksnu centralnu cijev prolazi vertikalno pomična cijev te ona omogućuje vertikalno pomicanje instrumenta i dodatno osigurava horizontalnu stabilnost instrumenta. Isto tako, na vertikalnoj pomičnoj cijevi pričvršćene su četiri mjerne ćelije „BM6G“ pod kutom od 45°. Tako se interval od 180° podijelio na četiri jednaka dijela. One s odgovarajućim vijcima dodiruju inoksne pločice koje su pričvršćene na podražajni valjak. Na vertikalnoj pomičnoj cijevi pričvršćeno je osam šipki, četiri na najvišoj točki i četiri na najnižoj točki vertikalno pomične cijevi, te je kut između susjednih šipki 90°. Na podražajnom valjku se nalazi osam rupa koje su predviđene za prolazak navedenih šipki. Šipke na taj način onemogućuju zakretanje podražajnog valjka uslijed snažnog udara morskog vala. Isto tako, šipke imaju ulogu i osiguravanja pozicije vijaka kako bi pri udaru morskog vala u podražajni valjak, vijci dodirivali inoksne pločice te na taj način direktno prenosili silu nastalu od morskog vala na mjerne ćelije. Na instrumentu se nalazi jedna plutača koja osigurava pozitivnu plovnost instrumenta. S obzirom na mogućnost vertikalnog pomicanja instrumenta kroz fiksnu centralnu cijev, pri vertikalnom gibanju morskih valova, instrument se uvijek nalazi neposredno ispod površine mora, gdje je i pritisak morskog vala najveći.



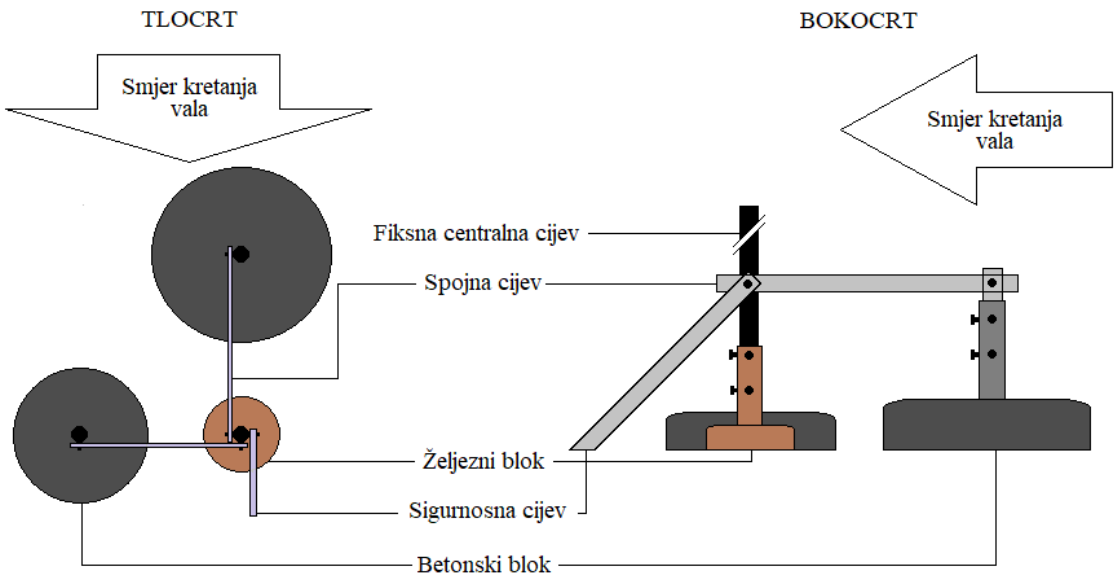
Slika 10. Shematski prikaz instrumenta Quattuor 45.



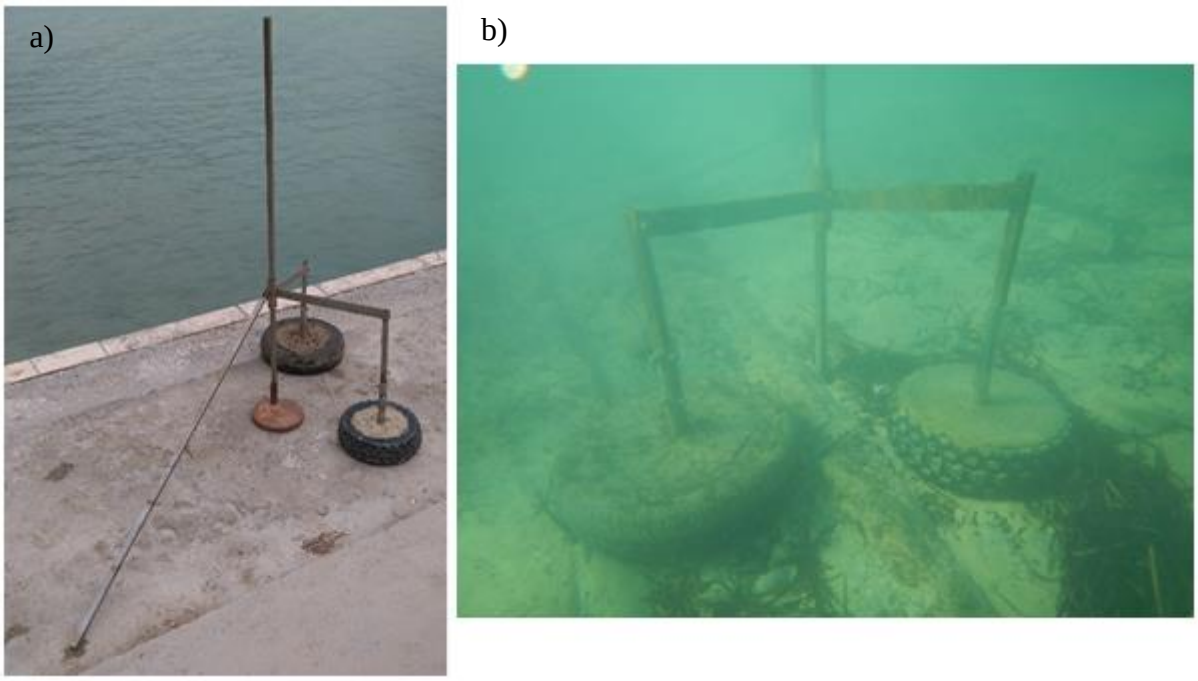
Slika 11. Instrument „Quattuor 45“ na kopnu (a) i u moru (b) (izvor: foto Branimir Jurun).

Sidrište instrumenta se sastoji od dva betonska bloka, jednog željeznog bloka i sigurnosne cijevi (Slika 12). U željeznom bloku je pričvršćena fiksna centralna cijev koja pridržava instrument „Quattuor 45“. Betonski blokovi se nalaze neposredno ispred željeznog

bloka, odnosno na strani odakle dolaze morski valovi. U središtu betonskog bloka nalazi se okomita cijev na kojoj je, pod pravim kutom, pričvršćena spojna cijev. Spojna cijev spaja okomitu cijev na betonskom bloku s fiksnoj centralnoj cijevi instrumenta. Svaki betonski blok ima sam za sebe, okomitu cijev i spojnu cijev. Dvije spojne cijevi, koje su pričvršćene na fiksnoj centralnoj cijevi su pod pravim kutom što znači i da su dva betonska bloka smještena pod pravim kutom. Sigurnosna cijev je pričvršćena na fiksnu centralnu cijev instrumenta te se nalazi na suprotnoj strani od betonskog bloka to jest na suprotnoj strani odakle dolaze valovi. Drugi kraj cijevi je zabijen u morsko dno, a uloga sigurnosne cijevi jest osiguravanje horizontalne stabilnosti na suprotnoj strani od betonskog bloka. S ovakvom konstrukcijom se pri snažnom udaru morskog vala, osigurava horizontalna stabilnost instrumenta kako bi dobiveni podatak bio u potpunosti reprezentativan.



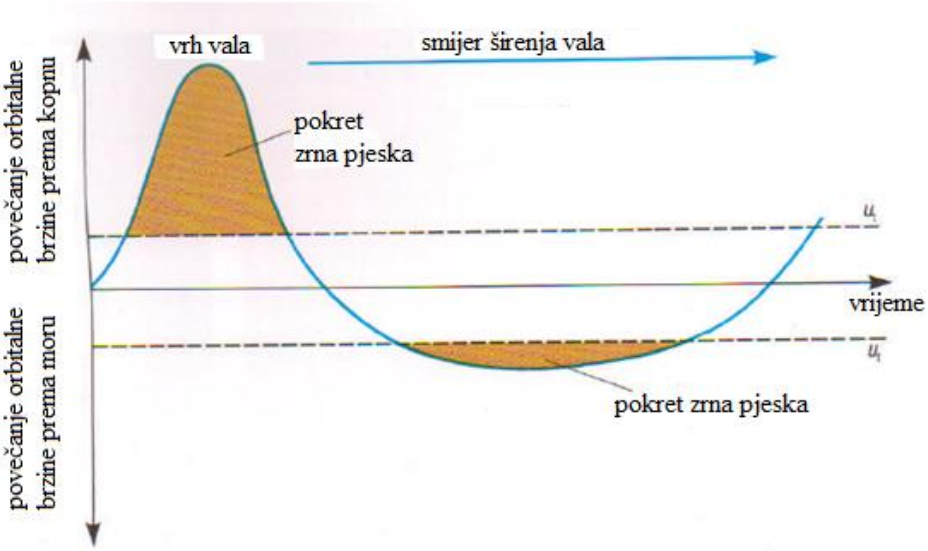
Slika 12. Shematski prikaz sidrišta instrumenta Quattuor 45.



Slika 13. Sidrište instrumenta na suhom (a) i u moru (b) (izvor: foto Branimir Jurun).

2.2.2. Prijenos sile iz mehaničkog dijela na elektronički dio instrumenta „Quattuor 45“

Prema Wright i sur. (1999) maksimalna brzina vala se postiže dva puta pri prolazu vala, ali u dva različita smjera. Prva brzina je kada val ide prema kopnu, a druga brzina je kada se val povlači prema moru. Prva brzina vala, kada val ide prema obali, ima puno veće vrijednosti od druge brzine vala, kada ide prema moru (Slika 14). Međutim, prva brzina djeluje kraće u odnosu na drugu brzinu vala.

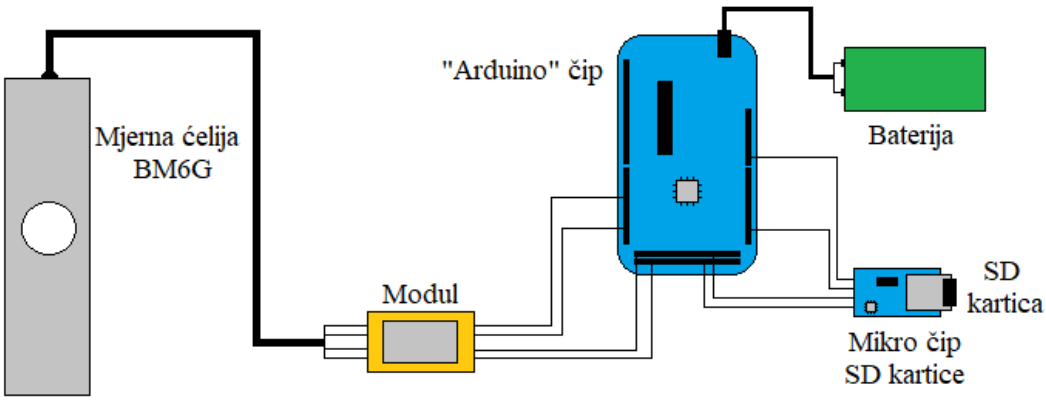


Slika 14. Promjena brzine vala s vremenom (izvor: prema Wright i sur., 1999).

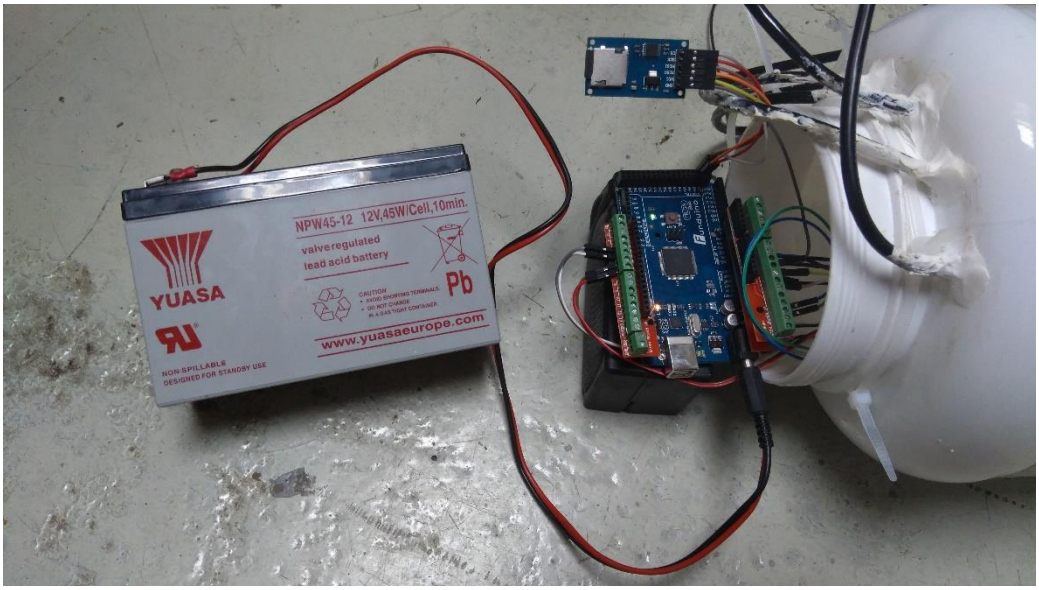
Odabrana brzina pri kojoj se pomiču zrna pijeska na plaži je prikazano isprekidanom linijom u_t. Osjenčana područja ispod krivulje predstavljaju brzine pri kojima dolazi do pomicanja zrna sedimenta, a neosjenčana područja ispod krivulje predstavljaju brzine vala pri kojima sediment ostaje ne pomaknut. Vrijednosti prve brzine, kada val ide prema kopnu, je na grafu prikazano u pozitivnim vrijednostima, dok je druga brzina, kada se val povlači prema moru, prikazana u negativnim vrijednostima (Wright i sur., 1999).

Može se vidjeti da val pri prvom udaru u sediment djeluje svojom najvećom silom. Takvo djelovanje vala na sediment je bitno kraće u odnosu na djelovanje vala u suprotnom smjeru. Fokus ovoga rada jest memoriranje najveće sile vala u određenom trenutku, stoga je instrument „Quattuor 45“ konstruiran tako da memorira samo silu valova koje djeluju u smjeru prema kopnu, na slici 14 prikazano u pozitivnom smjeru.

Instrument „Quattuor 45“ je cijeli uronjen u more te se njegova najviša točka nalazi na samoj površini mora. Prilikom udara morskog vala, sila se prenosi na pola površine podražajnog valjka to jest u intervalu od 180° iz smjera odakle dolaze morski valovi. Dijelovi instrumenta kao što su podražajni valjak, inoksne pločice i vijci koji su pričvršćeni za mjerne ćelije mogu se svrstati u mehanički dio instrumenta jer prenose silu nastalu pri udaru morskog vala. Možemo reći da su mjerne ćelije dijelovi instrumenta koji „spajaju“ mehanički dio s elektroničnim dijelom instrumenta. One mehaničku silu pretvaraju u električni impuls te ga šalju u elektronički dio instrumenta „Quattuor 45“ (Slika 15). Mjerna ćelija pretvorene podatke šalje na modul koji elektronične podatke pretvara u podatke prepoznatljive čipu „Arduino“. Na čip „Arduino“ priključen je mikro čip SD kartice. Čip „Arduino“ silu dobivenu iz četiri mjerne ćelije i brzinu vjetra od anemometra bilježi na način da se podaci svakog senzora zapisuju u svoj stupac. Takvi podaci se pohranjuju u SD karticu. Zatim se, SD kartica uključi u računalo te se radi detaljna obrada podataka.



Slika 15. Shematski prikaz elektroničkog dijela instrumenta „Quattuor 45“.



Slika 16. Elektronični dio instrumenta „Quattuor 45“.

2.2.3. Programiranje i obrada podataka

U elektronički dio instrumenta ubrajamo četiri mjerne ćelije „BM6G“, module za čip „Arduino“, čip „Arduino“ i mikro čip SD kartice. Kao i što je prikazano u slici 17 čip Arduino je programiran na način da svakih pola sekunde šalje po jedan podatak od svake mjerne ćelije i jedan podatak od anemometra u mikro čip SD kartice, što znači da u jednoj sekundi mikro čip SD kartice zapisuje deset podatka. Pri završetku mjerenja SD karticu, u kojoj su pohranjeni svi podaci, uključujemo u računalo. Podatke možemo očitati uz pomoć programu Excel gdje će se inicijalno generirati pet stupaca.

Mjerna ćelija 1	Mjerna ćelija 2	Mjerna ćelija 3	Mjerna ćelija 4	Brzina vjetra
0.10	6.50	0.00	0.70	6.94
0.10	9.30	0.00	1.40	7.43
0.60	9.40	0.00	5.00	7.43
0.10	8.60	0.00	2.20	7.33
0.10	5.80	1.50	-0.20	7.14
0.10	7.40	0.40	1.20	6.26
0.10	7.10	0.20	0.70	5.77
0.10	7.30	1.60	-0.20	5.77
0.10	7.40	0.50	0.40	5.96
0.50	7.20	-0.80	3.30	6.84
0.60	8.60	-0.10	4.10	7.14
0.10	11.50	0.00	1.20	6.36
0.10	8.30	0.00	-0.20	6.16
0.10	7.20	0.00	-0.20	5.96
0.10	6.00	1.10	-0.20	6.45
0.10	6.50	1.40	0.10	6.45
0.10	6.20	1.00	0.40	7.04
0.10	6.90	0.60	1.10	6.75
0.10	7.50	-0.30	1.60	6.55

Slika 17. Tablični prikaz podataka pohranjene na SD kartici.

U prva četiri stupca su prikazane sile izmjerene na svakoj mjernoj ćeliji, a u petom stupcu su prikazane vrijednosti brzine vjetra izmjerene anemometrom (Slika 17). Nakon spremanja podataka, slijedi obrada podataka. Svakih pola sekunde se zapisuje jedan podatak od svake mjerne ćelije i jedan podatak od anemometra. To znači da svaki redak predstavlja pola sekunde mjerenja, što znači da se u jednom satu mjerenja zapiše 7200 redaka.

Da bi se prikazalo vrijeme mjerenja podijeljeno po satu, formira se prvi stupac (Slika 18). U prvom retku dijelimo 1 sa 7200 što znači da taj redak predstavlja 1/7200 sata mjerenja. U drugom retku dijelimo 2 sa 7200 što znali da taj redak predstavlja 2/7200 sata mjerenja. U svakom sljedećem retku vrijednost brojnika, iz prethodnog retka, uvećavamo za 1, a vrijednost nazivnika ostaje 7200. Rezultat je prikazan s 10 decimalnih mjesta kako bi pri izradi grafikona prikazali što točnije vrijeme mjerenja. Kako bi prikazali pritisak morskog vala potrebno je formirati dva stupca. Mjerna ćelija koja bilježi najveću vrijednost prikazuje da je na tom dijelu podražajnog valjka, val djelovao okomito to jest sa svojom maksimalnom silom te to predstavlja reprezentativni podatak o sili vala. Stoga, upotrebljavamo samo najveći podatak između četiri mjerne ćelije, a preostala tri podatka, dobivena u istom trenutku, ne upotrebljavamo. Formiramo stupac pod imenom „Max“, koji uzima maksimalnu vrijednost između četiri mjerne ćelije koje

se nalaze u istom retku. Zatim se, kako bi se pritisak vala prikazao u mjernoj jedinici kN/m^2 formira stupac pod imenom „Pritisak morskog vala [kN/m^2]“. U tom stupcu se svaka vrijednost iz stupca „Max“ pomnoži s koeficijentom 0,27747 koji je objašnjen u poglavlju „Mjera pritiska morskog vala“. Kako bi pritisak morskog vala prikazali što točnije u svim računskim radnjama broj je napisan s 5 decimalnih mjesta te je isto tako pritisak morskog vala u obrađenoj bazi podataka prikazan s 5 decimalnih mjesta. Anemometar brzinu vjetra bilježi u mjernoj jedinici m/s, a kako bi brzinu vjetra prikazali mjernoj jedinici km/h, svaki podatak pomnožimo s koeficijentom koji je prikazan u formuli:

$$1\frac{m}{s} = \frac{\frac{1}{1000}\,km}{\frac{1}{3600}\,h} \tag{2}$$

$$1\frac{m}{s} = 3{,}6\frac{km}{h}$$

Vrijeme mjerenja [h]	Mjerna ćelija 1	Mjerna ćelija 2	Mjerna ćelija 3	Mjerna ćelija 4	Max	Pritisak morskog vala [kN/m^2]	Brzina Vjetra [m/s]	Brzina Vjetra [km/h]
14.6108333333	0.10	6.50	0.00	0.70	6.50	1.80359	6.94	24.98
14.6109722222	0.10	9.30	0.00	1.40	9.30	2.58051	7.43	26.75
14.6111111111	0.60	9.40	0.00	5.00	9.40	2.60826	7.43	26.75
14.6112500000	0.10	8.60	0.00	2.20	8.60	2.38628	7.33	26.39
14.6113888889	0.10	5.80	1.50	-0.20	5.80	1.60935	7.14	25.70
14.6115277778	0.10	7.40	0.40	1.20	7.40	2.05331	6.26	22.54
14.6116666667	0.10	7.10	0.20	0.70	7.10	1.97007	5.77	20.77
14.6118055556	0.10	7.30	1.60	-0.20	7.30	2.02557	5.77	20.77
14.6119444445	0.10	7.40	0.50	0.40	7.40	2.05331	5.96	21.46
14.6120833333	0.50	7.20	-0.80	3.30	7.20	1.99782	6.84	24.62
14.6122222222	0.60	8.60	-0.10	4.10	8.60	2.38628	7.14	25.70
14.6123611111	0.10	11.50	0.00	1.20	11.50	3.19096	6.36	22.90
14.6125000000	0.10	8.30	0.00	-0.20	8.30	2.30304	6.16	22.18
14.6126388889	0.10	7.20	0.00	-0.20	7.20	1.99782	5.96	21.46
14.6127777778	0.10	6.00	1.10	-0.20	6.00	1.66485	6.45	23.22
14.6129166667	0.10	6.50	1.40	0.10	6.50	1.80359	6.45	23.22
14.6130555556	0.10	6.20	1.00	0.40	6.20	1.72034	7.04	25.34
14.6131944445	0.10	6.90	0.60	1.10	6.90	1.91458	6.75	24.30
14.6133333333	0.10	7.50	-0.30	1.60	7.50	2.08106	6.55	23.58

Slika 18. Prikaz obrađene baze podataka.

2.2.4. Mjera pritiska morskog vala

Više parametara je potrebno definirati kako bi se jasno prikazala mjera pritiska morskog vala. Morski val, pri udaru u instrument, direktno djeluje u podražajni valjak. Visina podražajnog valjka (*h*) iznosi 30 cm, a radijus (*r*) 15 cm što znači da površina podražajnog valjka (*A*) iznosi:

$$A = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot h \tag{3}$$

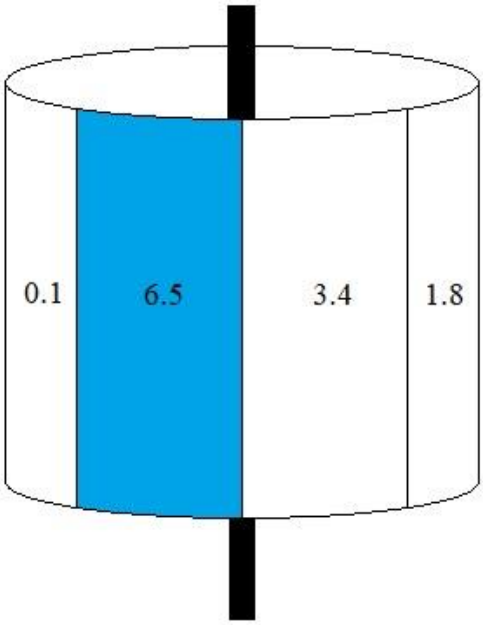
$$A = 2 \cdot 15\ cm \cdot \pi \cdot 30\ cm$$

$$A = 2827{,}4\ cm^2$$

$$A = \frac{2827{,}4}{10000}\ m^2$$

$$A = 0{,}28274\ m^2$$

Podražajna ploha instrumenta je u obliku valjka, a s tim se postiže da valovi, bez obzira iz kojeg smjera da dolaze, okomito djeluju na podražajnu plohu te se na taj način ostvaruje najveće djelovanje sile morskog vala. Kao i što je prikazano na slici 19, sve mjerne ćelije su pričvršćene unutar polovice podražajnog valjka te primaju podražaj u intervalu od 180°. Navedena polovica podražajnog valjka je pod djelovanjem sile morskih valova, dok je druga polovica podražajnog valjka okrenuta prema obali. S obzirom da su četiri mjerne ćelije pričvršćene pod kutom od 45°, polovica površine podražajnog valjka, koja je okrenuta prema djelovanju morskih valova, je podijeljena na četiri jednaka djela. Svaka mjerna ćelija prima podražaje morskog vala unutar 1/8 od ukupne površine podražajnog valjka.



Slika 19. Prikaz dobivenih vrijednosti na podjednako podijeljenoj površini podražajnog valjka u intervalu od 180°.

Najveća vrijednost, između četiri mjerne ćelije, predstavlja 1/8 površine podražajnog valjka na kojem je morski val djelovao okomito. Instrument unutar pola sekunde memorira četiri vrijednosti kao što je prikazano na slici 19. S obzirom na dobiveni najveći podatak u vrijednosti od 6,5, dokazujemo da je morski val na površinu obojanom plavom bojom djelovao okomito to jest sa svojom maksimalnoj silom. Mjerna ćelija prikazuje vrijednosti u mjernoj jedinici kg pa kako bi vrijednost prikazali u silu, množimo je s koeficijentom 9,80665 te na taj način masu pretvaramo u silu izraženu u N. Dobivenu vrijednost dijelimo s 1000 te se dobije sila izražena u kN. Pola ukupne površine podražajnog valjka podjednako je podijeljeno s četiri mjerne ćelije, a druga polovica valjka, koja je okrenuta prema obali, nije izložena morskim valovima. Stoga, površina plohe na koju je djelovao morski val se dobije da se ukupna površina podražajnog valjka podjeli s umnoškom 2 (polovica valjka koja nije izložena morskim valovima) i 4 (podjednako podijeljena površina na koju morski valovi djeluju).

Kada je maksimalna vrijednost između četiri mjerne ćelije 1, pritisak morskog vala se izračunava formulom:

$$p = \frac{\frac{1 \cdot 9{,}80665}{1000}\ kN}{\frac{A}{2 \cdot 4}\ m^2} \tag{4}$$

$$p = \frac{\frac{1 \cdot 9{,}80665}{1000}\ kN}{\frac{0{,}28274}{2 \cdot 4}\ m^2}$$

$$p = 0{,}27747\ kN/m^2$$

Broj 0,27747 predstavlja koeficijent pritiska morskog vala. Najveću vrijednost dobivenu između četiri mjerne ćelije množimo s koeficijentom pritiska morskog vala te je rezultat pritisak morskog vala izražen u $\mathrm{kN/m^2}$.

Zadnji parametar koje je potrebno definirati jest dubina mora na kojoj instrument vrši mjerenje. To je jedini parametar koji se može mijenjati pri mjerenju na različitim područjima. Srednja dubina mora na kojoj je instrument mjerio je 1,6 m.

Ukoliko bi se mjerenje vršilo pri dubini od 1,6 m, kao što je slučaj mjerenja prikazan u ovom radu, mjernoj oznaci se pridoda indeks 1,6 te se mjerna oznaka piše "$p_{1,6}$„. Na primjer, u određenom trenutku, instrument „Quattuor 45" zabilježio je podatak od 7 kg. Dobiveni broj se pomnoži s koeficijentom pritiska morskog vala kako bi vrijednost prikazali u mjernoj jedinici $\mathrm{kN/m^2}$. Kada uvažimo sve navedene tvrdnje, slijedi:

$$p_{1,6} = 7 \cdot 0{,}27747\ kN/m^2 \tag{5}$$

$$p_{1,6} = 1{,}94\ kN/m^2$$

Nisu definirani parametri čije oscilacije ne uzrokuju značajne promjene u vrijednostima pritiska morskog vala. Na primjer, promjene temperature i gustoće mora imaju jako mali utjecaj na promjenu pritiska morskog vala koji djeluje na instrument ili na morsku obalu. Isto tako, nisu navedeni parametri koji pri promjeni područja mjerenja ostaju isti, kao što je to na primjer trenje između mora i površine instrumenta.

3. REZULTAT I RASPRAVA

Mjerenje pritiska morskog vala i brzine vjetra provedeno je 9. prosinca 2017. godine. Tog dana puhalo je umjereno i jako jugo te je u prijepopodnevnim satima okrenulo na istočnjak i buru. U večernjim satima je vjetar jačao te je mjestimice bura dostizala i olujne udare. U jutarnjim satima 10. prosinca 2017. godine pod utjecajem polja povišenog tlaka zraka bilo je djelomice i pretežno sunčano. Puhao je umjereni sjevernoistočni vjetar te su se prosječne satne vrijednosti kretale do 20 km/h. U popodnevnim satima vjetar je mijanjao smjer te je puhalo jako i mjestimice olujno jugo. Na meteorološkoj stanici Split – Marjan prosječne satne vrijednosti juga su se kretale od 40 do 50 km/h, a udari juga su iznosili do 75,6 km/h. Sljedećeg dana 11. prosinca vrijednosti južnog vjetra se nisu drastično mijenjale te su se prosječne satne vrijednosti kretale od 50 do 57,6 km/h s jakim olujnim udarima do 86,5 km/h.

Tablica 2. Podaci karakteristika vjetra s meteorološke stanice Split – Marajan.

Datum	Sat	Smjer	Srednja vrijednost brzine vjetra [km/h]	Udar vjetra [km/h]	Datum	Sat	Smjer	Srednja vrijednost brzine vjetra [km/h]	Udar vjetra [km/h]
12.9.2017	0:00	SSE	32.4	68.4	12.10.2017	11:00	SSE	18	----
12.9.2017	3:00	SSW	50.4	72	12.10.2017	12:00	ESE	28.8	----
12.9.2017	4:00	SSW	50.4	72	12.10.2017	13:00	S	28.8	----
12.9.2017	5:00	SSW	50.4	75.6	12.10.2017	14:00	SSE	28.8	----
12.9.2017	6:00	SSW	50.4	75.6	12.10.2017	15:00	SSE	39.6	57.6
12.9.2017	7:00	NNW	25.2	----	12.10.2017	19:00	SSE	39.6	----
12.9.2017	8:00	NNE	3.6	----	12.10.2017	20:00	SSE	43.2	----
12.9.2017	9:00	N	3.6	----	12.10.2017	21:00	SSE	46.8	68.4
12.9.2017	10:00	N	21.6	----	12.11.2017	0:00	SSE	50.4	75.6
12.9.2017	11:00	WSW	10.8	----	12.11.2017	3:00	SSE	54	75.6
12.9.2017	13:00	ENE	28.8	----	12.11.2017	4:00	S	46.8	72
12.9.2017	14:00	ENE	36	----	12.11.2017	5:00	SSE	50.4	75.6
12.9.2017	15:00	ENE	36	61.2	12.11.2017	6:00	SSE	54	75.6
12.9.2017	18:00	NNE	43.2	75.6	12.11.2017	7:00	SSE	54	79.3
12.9.2017	19:00	NE	46.8	79.3	12.11.2017	8:00	SSE	50.4	82.9
12.9.2017	20:00	NNE	36	82.9	12.11.2017	9:00	SSE	50.4	82.9
12.9.2017	21:00	N	18	82.9	12.11.2017	10:00	SSE	57.6	75.6
12.10.2017	0:00	NNE	18	----	12.11.2017	11:00	SSE	54	86.5
12.10.2017	3:00	N	10.8	----	12.11.2017	12:00	SSE	54	86.5
12.10.2017	4:00	ENE	21.6	----	12.11.2017	13:00	SSE	36	68.4
12.10.2017	5:00	ENE	18	----	12.11.2017	14:00	SSE	50.4	75.6
12.10.2017	6:00	ENE	18	----	12.11.2017	15:00	SSE	57.6	82.9
12.10.2017	7:00	ENE	18	----	12.11.2017	18:00	SSE	54	82.9
12.10.2017	8:00	ENE	18	----	12.11.2017	19:00	SSE	50.4	72
12.10.2017	9:00	ENE	10.8	----	12.11.2017	21:00	SSE	57.6	----
12.10.2017	10:00	SSE	10.8	----	12.12.2017	0:00	SSE	54	79.3

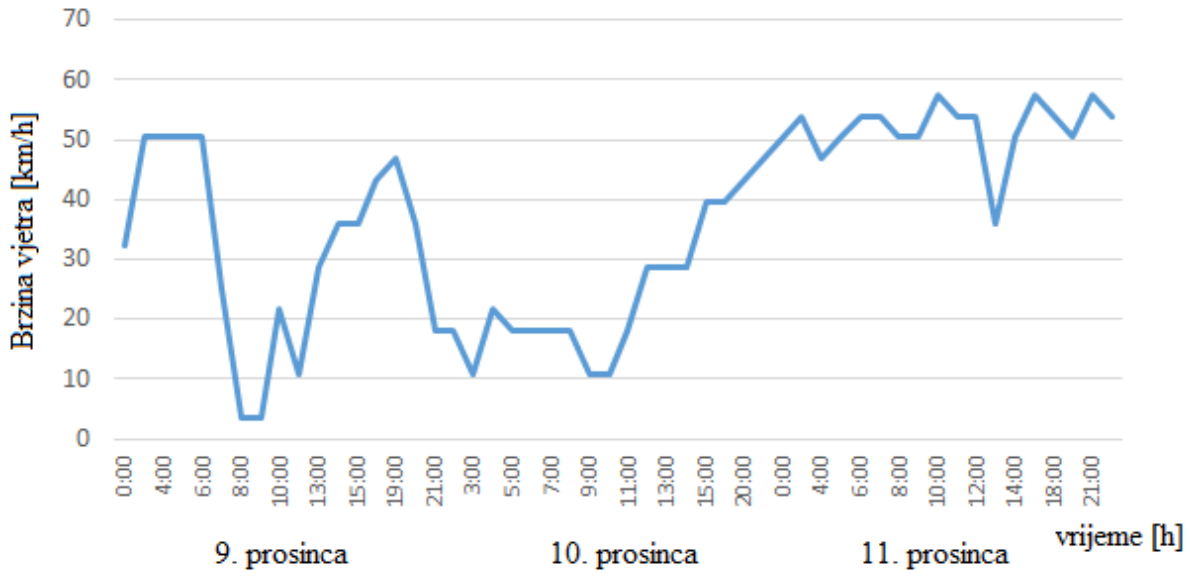
(izvor: OGIMET 2018. Professional information about meteorological conditions in the world. Dostupno sa: http://www.ogimet.com/cgi-bin/gsynres?lang=en&ind=14445&ano=2017&mes=12&day=31&hora=23&min=0&ndays=30, pristupljeno: svibanj 2018. godine).

U tablici 2 su zbog bolje preglednosti podataka vrijednosti prikazane u bojama. Stoga su vrijednosti od 0 do 10 km/h prikazane žutom bojom, od 10 do 30 km/h su prikazane nijansama zelene boje te od 30 do 90 km/h su prikazane nijansama plave boje. Kako su vrijednosti veće tako je boja tamnija.

Osjenčeni vremenski interval prikaza u tablici 2 predstavlja vrijeme mjerenja pritiska morskog vala s instrumentom „Quattuor 45“ na području splitskog akvatorija na plaži Duilovo.

Brzina vjetra je u tablici 2 prikazana kao, srednja satna vrijednost i udar vjetra. Unutar jednog sata se mjerila brzina vjetra te je prosječna satna vrijednost brzine vjetra zapisana u istoimenom stupcu. Tijekom određenog sata, ukoliko bi udar vjetra bio značajan, brzina udara vjetra bi se zapisala u stupcu „Udar vjetra [kN/h]“. Tijekom sata mjerenja ako brzina vjetra ne bi značajno odstupala, od srednje vrijednosti brzine vjetra, udar vjetra se ne bi zapisao.

Na slici 20 je prikazan grafički prikaz srednje satne vrijednosti brzine vjetra koji je zapisan s meteorološke postaje Split – Marjan. Podaci za izradu grafikona vremenskog niza srednje satne vrijednosti brzine vjetra je preuzet iz tablice 2.



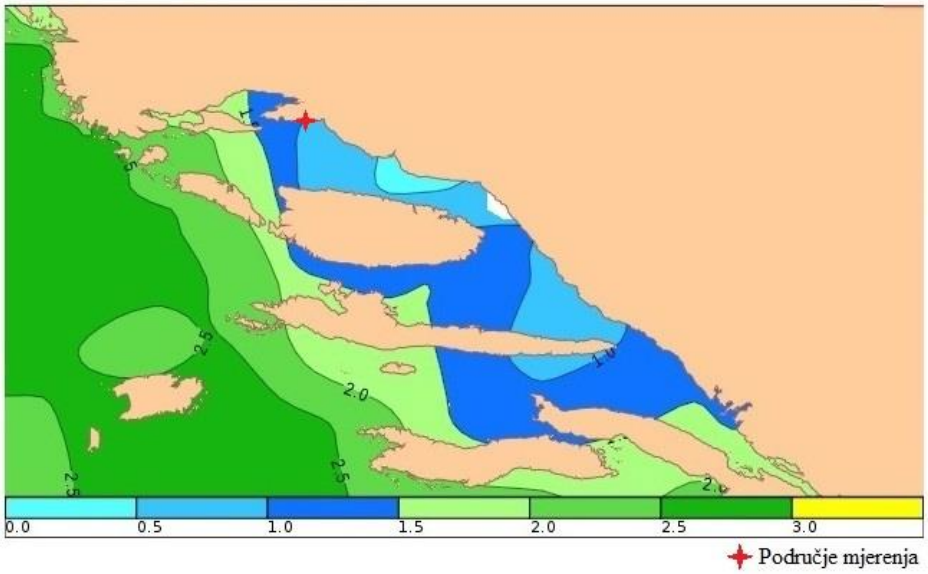
Slika 20. Grafički prikaz srednje satne vrijednosti brzine vjetra s meteorološke postaje Split – Marjan u razdoblju od 9. do 11. prosinca 2017. godine.

Od 10. prosinca popodnevnih sati do 11. prosinca jutarnjih sati, iznad plaže Duilovo puhao je južni vjetar. U tom razdoblju smjer vjetra se nije mijenjao te su se petnaestominutne prosječne vrijednosti kretale od 15 do 25 km/h s udarima od 40 km/h. Isto tako, Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) je svojim prognostičnim modelom odredio visinu vala na

području splitskog akvatorija gdje je postavljen instrument „Quattuor 45“. Vjetar je uzrokovao površinske valove do jednog metara valne visine kao i što se vidi na slici 21.

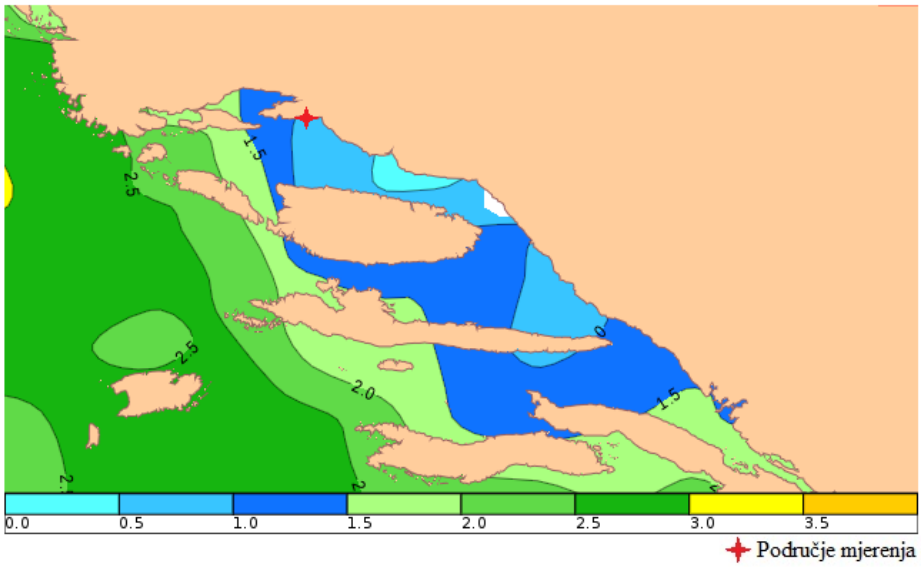
a)

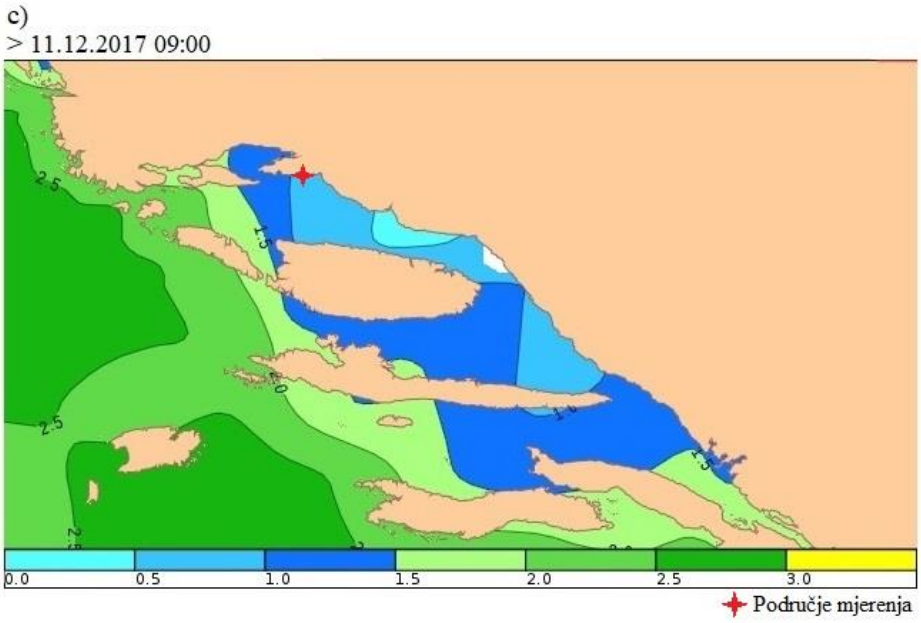
> 11.12.2017 03:00 h



b)

> 11.12. 2017 06:00 h



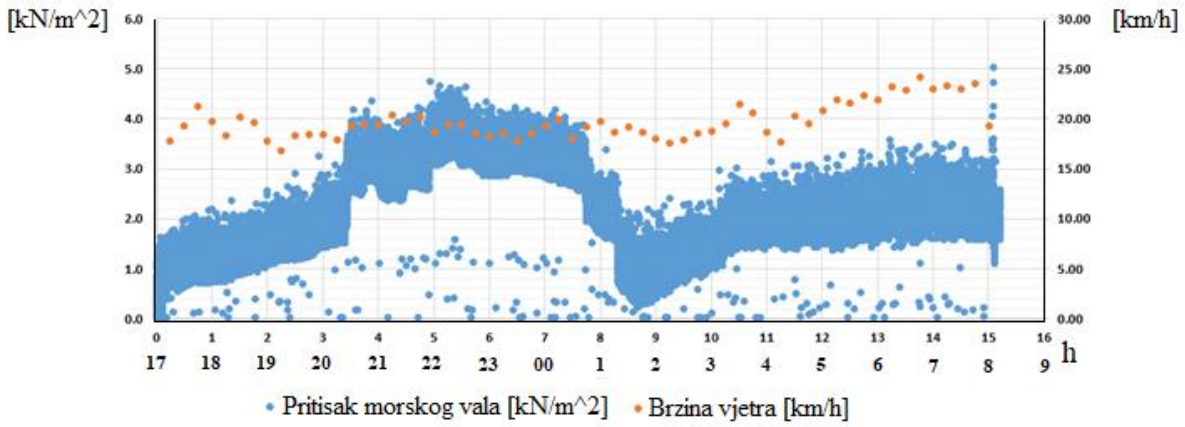


Slika 21. DHMZ-ov prognostički model visine vala u a) 3:00 h b) 6:00 h c) 9:00 h 11. prosinca 2017. godine.

Dana 10. prosinca instrument „Quattuor 45“ je od 17:00 sati do 8:15 sati, slijedećeg dana, bio u funkciji mjerenja te je postignuto kontinuirano prikupljanje podataka pritiska morskog vala i brzine vjetra. Pri završetku mjerenja, podaci su se obradili, kao što je objašnjeno u poglavlju „Programiranje i obrada podataka“ te je kreiran višestruki linijski graf vremenskog niza pritiska morskog vala i brzine vjetra. Na x osi grafikona je prikazano vrijeme mjerenja, dok je na primarnoj osi y, koja se nalazi na lijevoj strani grafikona, prikazan pritisak morskog vala izražen u kN/m^2, a na sekundarnoj osi y, koja se nalazi na desnoj strani grafikona, je prikazana brzina vjetra izražen u km/h.

Zbog velikih oscilacija brzine vjetra, napravljena je statistička analiza podataka brzine vjetra. Kao što je već rečeno, svakih pola sekunde zabilježena je brzina vjetra. U ovom slučaju svakih 15 minuta izračunata je srednja vrijednost brzine vjetra te je na grafikonu prikazana u obliku točke.

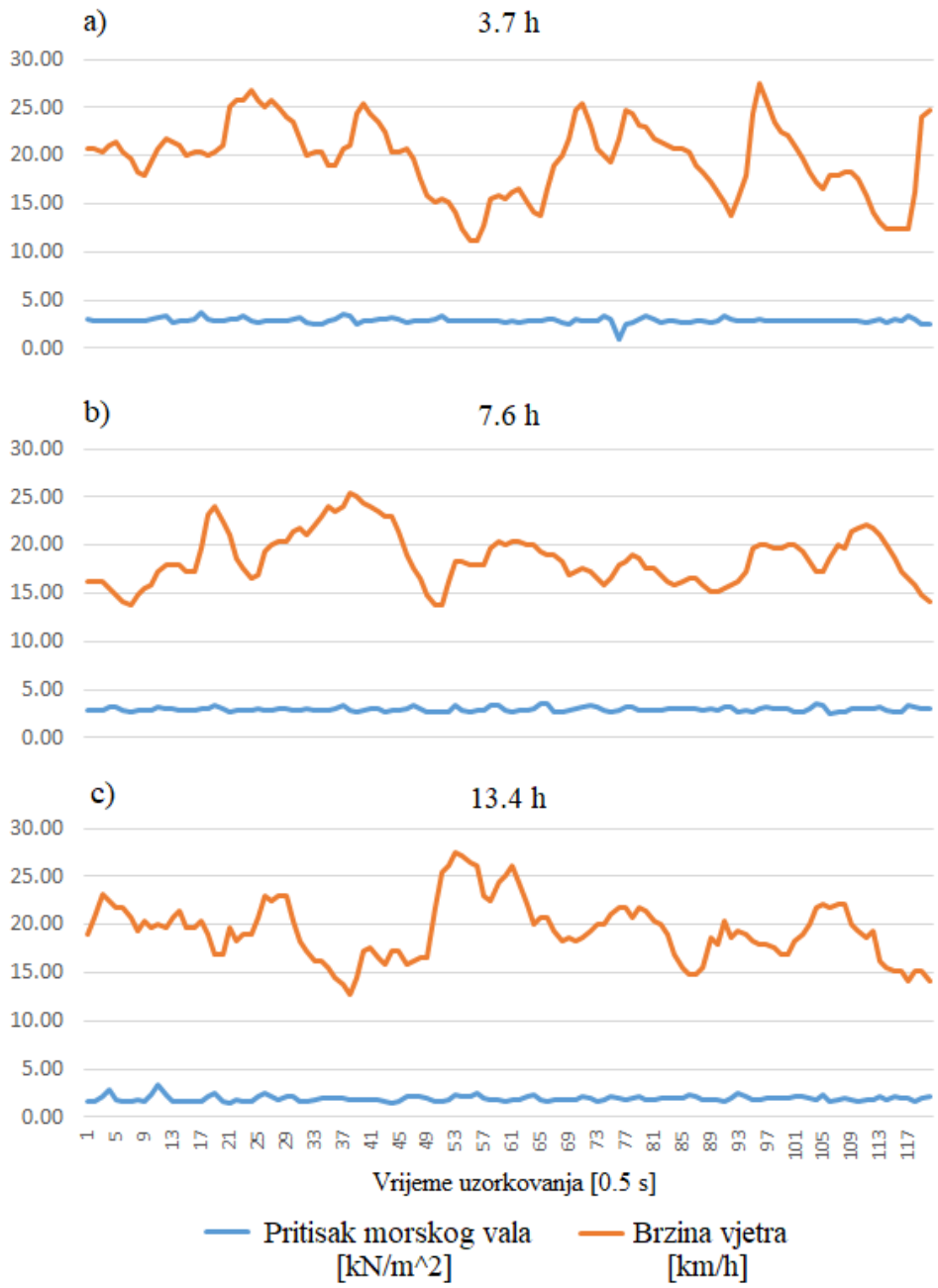
Elektronični dio instrumenta „Quattuor 45“ je programiran na način da u vrlo kratkom vremenskom periodu zabilježi silu kojom je morski val djelovao na podražajni valjak. Tako se ostvaruje memoriranje sile vala kada je morski val na podražajni valjak djelovao sa svojom najvećom silom, brijegom vala, i s minimalnoj silom, dolom vala. Upravo je to na slici 22 prikazano u obliku zadebljane plave krivulje. Zadebljana krivulja prikazuje oscilaciju vrijednosti pritiska morskog vala kojim je val djelovao na podražajni valjak instrumenta. Pritisak morskog vala je kroz cijelo mjerenje djelovao različitim vrijednostima.



Slika 22. Vremenski nizovi pritiska morskog vala i brzine vjetra dana 10. i 11. prosinca 2017. godine.

Od početka mjerenja pritisak morskog vala je linearno rastao. U 20:30 10. prosinca pritisak morskog vala je iznosio 3 kN/m^2. Od 20:30 do 00:30 sati, vrijednost je naglo porasla do 4 kN/m^2 te je sve do 00:30 zabilježen približno jednak pritisak vala. U 22:15 zabilježeno je najjači pritisak morskih valova te su vrijednosti oscilirale od 2,3 do 4,8 kN/m^2. U vremenu od 00:30 do 2:00 sata 11. prosinca 2017. godine, pritisak morskog vala je opao, a vrijednosti su zabilježene do 1,8 kN/m^2. Od 2:00 do 3:00 pritisak vala je opet rastao te je od 3:00 pa se do kraja mjerenja, do 8:15, oscilirao u vrijednostima od 1,5 do 3,5 kN/m^2 (Slika 22).

Kako bi pobliže prikazali oscilacije pritiska morskog val i brzine vjetra, na slici 23, su prikazana tri grafikona vremenskog niza pritiska morskog vala i brzine vjetra unutar jedne minute. Podaci za izradu grafikona su preuzeti u točno navedenom satu mjerenja iz grafikona koje je prikazan na slici 22. Za grafikon a), preuzeti su podaci iz 3,7 sata mjerenja, za grafikon b), preuzeti su podaci iz 7,6 sata mjerenja, dok su za grafikon c), preuzeti podaci iz 13,4 sata mjerenja.



Slika 23. Vremenski niz pritiska morskog vala i brzine vjetra u točno određenom satu mjerenja u vremenu od jedne minute.

Iz grafikona možemo vidjeti da pritisak morskog vala, unutar jedne minute, oscilira više puta, međutim vrijednosti nikada ne osciliraju više od 1,8 kN/m^2. Kod brzine vjetra imamo potpuno drugi slučaj. Vrijednosti brzine vjetra osciliraju u mnogo većim intervalima te su te promjene mnogo izraženije u odnosu na oscilacije pritisaka morskog vala.

4. ZAKLJUČCI

- U ovom radu je opisan i prezentiran rad mjernog instrumenta „Quattuor 45“. Tim instrumentom se mjeri pritisak morskog vala i brzina vjetra na ispitivanom području.
- Detaljno je opisana izgradnja instrumenta „Quattuor 45“, konstrukcija sidrišta, način rada instrumenta te programiranje i obrada podataka.
- U cilju dobivanja reprezentativnog podatka o pritisku morskog vala, kao i o brzini vjetra, konstruiran je sustav sidrišta instrumenta. Pri snažnom udaru morskog vala instrument „Quattuor 45“ ostaje horizontalno stabilan te se sva nastala sila prenosi na podražajni valjak instrumenta.
- U rezultatima diplomskog rada detaljno je opisano mjerenje instrumentom “Quattuor 45“ na području splitskog akvatorija na plaži Duilovo. Uz opis hidrometeoroloških parametara kada je mjerenje provedeno, tablično i grafički su prezentirani dobiveni rezultati mjerenja pritiska vala i brzine vjetra.
- Rezultati su prikazani u prihvaćenim mjernim jedinicama SI sustava. Pritisak morskog vala se prikazuje u mjernoj jedinici $\mathrm{kN/m^2}$, a brzinu vjetra u mjernoj jedinici km/h. Instrumentom „Quattuor 45“ djelovanje morskog vala pretvaramo u korisnicima poznat broj.
- Cilj izrade instrumenta je nadzor morskih valova na određenom području u realnom vremenu. Može se koristiti svugdje u priobalju gdje je djelovanje morskih valova od velike važnosti kao što su to putničke luke, različite morske instalacije, uzgajališta školjaka i riba, naftne platforme i slično.
- Postoji niz mogućnosti unapređenja instrumenta „Quattuor 45“. Plan je instrument sinkronizirati s mobilnim uređajem i softverskim paketom kako bi podatke o pritisku vala i brzini vjetra na određenom području mogli koristiti svi oni kojima je djelovanje valova od velike važnosti.

5. LITERATURA

Atlas R, Hoffman RN, Bloom SC. 1993. Surface wind velocity over the oceans. U: Gurney RJ, Foster JL, Parkinson CL. A*tlas of satellite observations related to global change*. University Press, Cambridge, str 129–140.

Beardsley RC, Enriquez AG, Friehe CA, Alessi CA. 1997. Intercomparison of aircraft and buoy measurements of wind speed and wind stress during smile. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 8: 969–977.

Bohuslavek Z. 2010. Wireless Communicated Smart Wind Sensor. World Academy of Science, Engineering and Technology, 5: 1710- 1714.

Buljan M, Zore-Armanda M. 1972. Osnovi oceanografije i pomorske meteorologije, Institut za oceanografiju i ribarstvo, Split, 253 str.

Kent EC, Taylor PK. 1997. Choice of a Beaufort Scale. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 14: 228–242.

Liu W.T. 2002. Progress in scatterometer application. Journal of Oceanography, 58: 121– 136.

Mala Internet škola oceanografije 2018. Mjerenja površinskih valova. Dostupno sa: http://skola.gfz.hr/m5.htm, pristupljeno: svibanj 2018. godine

Maury MF. 1855. Physical Geography of the Sea. Harper & Brothers, New York, 180 str.

OGIMET 2018. Professional information about meteorological conditions in the world. Dostupno sa: http://www.ogimet.com/cgi-bin/gsynres?lang=en&ind=14445&ano=2017&mes=12&day=31&hora=23&min=0&ndays=30, pristupljeno: svibanj 2018. godine.

Peet Bros. 2018. Anemometer. Dostupno sa: http://www.peetbros.com/shop/custom.aspx?recid=17,pristupljeno: svibanj 2018. godine

Stewart R H. 2008. Introduction to Physical Oceanography, Texas A & M University, Texas, 358 str.

Vogelzang J, Boogaard K, Reichert K, Hessner K. 2000. Wave Height Measurements with Navigation Radar. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 8: 1652-1659.

Wright J, Colling A, Park D. 1999. Waves, Tides and Shallow-Water Processes. Butterworth-Heinemann, United Kingdom, 223 str.