

PRIMJENA VIŠESNOPNOG DUBINOMJERA U SVRHU VIZUALIZACIJE I INTERPRETACIJE MORSKOG DNA

Ivanković, Ines

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:256:522670>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-10**



Repository / Repozitorij:

repozitorij.geof.unizg.hr/en



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEODETSKI FAKULTET**

Ines Ivanković

**PRIMJENA VIŠESNOPNOG DUBINOMJERA U
SVRHU VIZUALIZACIJE I INTERPRETACIJE
MORSKOG DNA**

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

Ines Ivanković ♦ DIPLOMSKI RAD ♦ 2024.



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEODETSKI FAKULTET**

Ines Ivanković

**PRIMJENA VIŠESNOPNOG DUBINOMJERA U
SVRHU VIZUALIZACIJE I INTERPRETACIJE
MORSKOG DNA**

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEODETSKI FAKULTET



Na temelju članka 19. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu i Odluke br. 1_349_11 Fakultetskog vijeća Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, od 26.10.2017. godine (klasa: 643-03/16-07/03), uređena je obaveza davanja „Izjave o izvornosti“ diplomskog rada koji se vrednuju na diplomskom studiju geodezije i geoinformatike, a u svrhu potvrđivanja da je rad izvorni rezultat rada studenata te da taj rad ne sadržava druge izvore osim onih koji su u njima navedeni.

IZJAVLJUJEM

Ja, **Ines Ivanković**, (JMBAG: 0007182450), rođen/a dana 10.09.2000. u Puli, izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi tog rada nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

U Zagrebu, dana _____

Potpis studenta / studentice

I. AUTOR	
Ime i prezime:	Ines Ivanković
Datum i mjesto rođenja:	10. rujna 2000., Pula, Republika Hrvatska
II. DIPLOMSKI RAD	
Naslov:	Primjena višesnopnog dubinomjera u svrhu vizualizacije i interpretacije morskog dna
Broj stranica:	60 + 3 priloga
Broj tablica:	7
Broj slika:	46
Broj bibliografskih podataka:	19 + 3 URL-a
Ustanova i mjesto gdje je rad izrađen:	Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Mentor:	doc. dr. sc. Vanja Miljković
Komentor:	/
Voditelj:	Mate Botica, mag. ing. geod. et geoinf.
III. OCJENA I OBRANA	
Datum zadavanja teme:	2.2.2024.
Datum obrane rada:	6.9.2024.
Sastav povjerenstva pred kojim je branjen diplomski rad:	doc. dr. sc. Vanja Miljković
	izv. prof. dr. sc. Andrija Krtalić
	izv. prof. dr. sc. Ante Marendić

Zahvala

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Vanji Miljković, voditelju Mati Botici, mag. ing. geod. et geoinf. i Lovri Klariću, mag. ing. geod. et geoinf. na prenesenom znanju i korisnim smjernicama tijekom izrade diplomskog rada.

Hvala mojoj obitelji i dečku Toniju na podršci.

Primjena višesnopnog dubinomjera u svrhu vizualizacije i interpretacije morskog dna

Sažetak: Propagacija zvučnih valova ovisna je o granicama medija, brzini, frekvenciji i intenzitetu zvuka pri prelasku između zraka i vode. Na granici medija, zvučni valovi se dijelom reflektiraju, a dijelom prenose, uz promjene u brzini i kutu prolaska zvuka. Zvučna atenuacija, uključujući apsorpciju i rasipanje, značajno smanjuje intenzitet zvuka i utječe na njegovu kvalitetu. Višesnopni dubinomjer je sofisticirani instrument koji koristi više snopova akustičkih valova za precizno mjerenje dubine morskog dna. Ova tehnologija omogućuje visokoučinkovito i detaljno kartiranje podmorja, pružajući informacije o topografiji i strukturama na dnu. Terensko prikupljanje podataka izvedeno je koristeći ovaj napredni alat. U sklopu ovog rada, istražuje se biocenoza u blizini grada Splita, s posebnim naglaskom na ulogu i stanje *Posidonie oceanice* u tom području. Rezultati analize otkrivaju prisutnost triju glavnih tipova podmorja: posidonije, kamenja i sedimenta. Ovi tipovi su izdvojeni u ovisnosti o intenzitetu povratnog signala, dubini i nagibu terena. Posidonija je ključna morska trava koja stvara podvodne livade i igra vitalnu ulogu u ekosustavima mediteranskih mora. Ona pruža stanište za mnoge morske vrste, stabilizira morsko dno i filtrira vodu, dok kroz fotosintezu proizvodi kisik. Ove informacije omogućuju detaljno razumijevanje raspodjele i stanja morskih staništa, naglašavajući važnost posidonije u očuvanju ekosustava. Diskusija rezultata ističe doprinos višesnopnog dubinomjera preciznom kartiranju podmorja. Rad pokazuje kako napredne tehnologije omogućuju detaljnije i točnije kartiranje, što je ključno za učinkovito upravljanje morskim resursima i očuvanje ekosustava. Ove spoznaje pružaju osnovu za buduća istraživanja i zaštitu važnih morskih staništa u Jadranskom moru.

Ključne riječi: *Jadransko more, kartiranje, povratno raspršenje, višesnopni dubinomjer.*

Application of the multibeam echo sounder for visualization and interpretation of the seabed

Abstract: The propagation of sound waves depends on the boundaries between media, speed, frequency, and intensity of sound when transitioning between air and water. At the media boundary, sound waves are partially reflected and partially transmitted, with changes in speed and angle of sound passage. Acoustic attenuation, including absorption and scattering, significantly reduces sound intensity and affects its quality. The multibeam echo sounder is a sophisticated instrument that uses multiple beams of acoustic waves to precisely measure the depth of the seafloor. This technology enables highly efficient and detailed seabed mapping, providing information about the topography and structures on the bottom. Field data collection was carried out using this advanced tool. This study investigates the biocoenosis near the city of Split, with a particular focus on the role and condition of *Posidonia oceanica* in the area. Analysis results reveal the presence of three main types of seafloor: *posidonia*, rocks, and sediments. These types were distinguished based on the intensity of the return signal, depth, and terrain slope. *Posidonia* is a crucial seagrass that forms underwater forests and plays a vital role in Mediterranean marine ecosystems. It provides habitat for many marine species, stabilizes the seafloor, and filters water, while also producing oxygen through photosynthesis. This information allows for a detailed understanding of the distribution and condition of marine habitats, highlighting the importance of *posidonia* in ecosystem conservation. The discussion of results emphasizes the contribution of the multibeam echo sounder to precise seabed mapping. The study demonstrates how advanced technologies enable more detailed and accurate mapping, which is essential for effective marine resource management and ecosystem preservation. These insights provide a basis for future research and protection of important marine habitats in the Adriatic Sea.

Keywords: *Adriatic sea, backscatter, mapping, multibeam echo sounder.*

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Metodologija.....	1
1.2. Motivacija.....	2
1.3. Hipoteza.....	2
1.4. Pregled dosadašnjih radova.....	2
1.5. Pregled sadržaja po poglavljima.....	2
2. HIDROGRAFIJA I OSNOVE PODVODNE AKUSTIKE.....	3
2.1. Hidrografija.....	3
2.2. Osnove podvodne akustike.....	5
2.3. Dubinomjeri.....	14
3. JADRANSKO MORE I KARTIRANJE MORSKIH STANIŠTA.....	18
3.1. Kartiranje morskih staništa.....	18
3.2. Jadransko more.....	19
4. TERENSKO PRIKUPLJANJE PODATAKA.....	22
4.1. OPREMA.....	23
4.1.1. Višesnopni dubinomjer.....	23
4.1.2. Inercijalni navigacijski sustav.....	26
4.1.3. Valeport miniSVP.....	27
5. OBRADA PODATAKA.....	29
5.1. Patch test i Teledyne PDS.....	29
5.2. CARIS HIPS & SIPS.....	33
5.2.1. Vessel Editor.....	33
5.2.2. Georeference bathimetry.....	34
5.2.3. Izrada plohe.....	35
5.2.4. Izrada plohe iz podataka povratnog raspršenja.....	36
5.2.5. Klasifikacija.....	37
6. REZULTATI I DISKUSIJA.....	40
7. ZAKLJUČAK.....	45
LITERATURA.....	46
PRILOZI.....	48
ŽIVOTOPIS.....	49

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Stroj za sondiranje dubokog mora (Littlehales, 1894)	4
Slika 2.2 Moderni sondirajući cilindar (Littlehales, 1894)	5
Slika 2.3 Profili brzine zvuka (prevedeno s engleskog na hrvatski, preuzeto i modificirano iz: Kuperman i Roux, 2014)	8
Slika 2.4 Snellov zakon refrakcije (prevedeno s engleskog na hrvatski, preuzeto i modificirano iz: Wahlberg i Larsen, 2017)	9
Slika 2.5 U slučaju da je upadni kut manji od kritičnog kuta, samo mali dio intenziteta upadnog zvuka će se prenijeti iz zraka u vodu. Međutim, za upadne kutove veće od kritičnog kuta dolazi do potpune regleksije, pri čemu se energija ne prenosi u vodu (prevedeno s engleskog na hrvatski, preuzeto i modificirano iz: Wahlberg i Larsen, 2017)	9
Slika 2.6 praćenje zraka u slojevitom mediju gdje se brzina zvuka povećava od jednog sloja do drugog, $c_1 < c_2 < c_3 < c_4$. Za svaki sloj kut refrakcije je veći od upadnog kuta (Wahlberg i Larsen, 2017)	10
Slika 2.7 Apsorpcija zvuka u morskoj vodi saliniteta = 35 ‰ i pH = 8,0 (prevedeno s engleskog na hrvatski, preuzeto i modificirano iz: Fisher i Simmons, 1977)	11
Slika 2.8 Ravni zvučni val pada na hrapavu površinu i raspršuje se na njoj (Bjørnø i dr., 2017)	13
Slika 2.9 Riblje jato koje pridonosi raspršenju zvuka u volumenu (Bjørnø i dr., 2017)	13
Slika 2.10 širokosnopni i uskosnopni dubinomjer (Pribičević, 2005)	15
Slika 2.11 vertikalna i horizontalna rezolucija jednosnopnog dubinomjera (Pribičević, 2005)	16
Slika 2.12 Višesnopni dubinomjer (Pribičević, 2005)	17
Slika 2.13 Sweep sustav (Pribičević, 2005)	18
Slika 3.1 Jadransko more (URL 1)	19
Slika 3.2 Izoterme Jadranskog mora zimi i ljeti (Pribičević, 2005)	20
Slika 3.3 Prikaz morskih struja Jadranskog mora ljeti i zimi (Pribičević, 2005)	21
Slika 3.4 Posidonia oceanica (Bakran-Petricioli, 2007)	22
Slika 3.5 Naslage lišća posidonije na obali (Bakran-Petricioli, 2007)	22
Slika 4.1 Teledyne Reson Seabat T20-P (URL 2)	23
Slika 4.2 Višesnopni dubinomjer montiran na strani broda (izvor: Lovro Klarić)	24
Slika 4.3 Demontaža opreme s broda (izvor: Lovro Klarić)	25
Slika 4.4 Inercijalni navigacijski sustav Applanix POS MV Wavemaster (URL 3)	27
Slika 4.5 Valeport miniSVP (izvor: Lovro Klarić)	28
Slika 5.1 Kutevi skretanja, posrtanja i ljuljanja (Pribičević, 2005)	29
Slika 5.2 Računanje korekcija u programu Teledyne PDS (izvor: Lovro Klarić)	30
Slika 5.3 Sound Velocity Profile Editor	30

Slika 5.4 Definiranje profila.....	31
Slika 5.5 Profil ljuljanja	31
Slika 5.6 Profil posrtanja.....	32
Slika 5.7 Profil skretanja	32
Slika 5.8 Vessel Editor	34
Slika 5.9 Georeferencirani podaci batimetrije.....	35
Slika 5.10 CUBE ploha	35
Slika 5.11 Kontrola kvalitete podataka prema IHO – S44 specifikacijama.....	36
Slika 5.12 Ploha nastala iz povratnog raspršenja	37
Slika 5.13 Ploha nagiba terena	37
Slika 5.14 Izraz za izdvajanje područja posidonije	38
Slika 5.15 Izdvojena područja posidonije	38
Slika 5.16 Izraz za izdvajanje kamenja na morskom dnu	39
Slika 5.17 Izdvojeno kamenje na morskom dnu	39
Slika 5.18 Izraz za izdvajanje sedimenta na morskom dnu.....	40
Slika 5.19 Izdvojeni sediment na morskom dnu	40
Slika 6.1 Prikaz plohe dobivene iz podataka povratnog raspršenja na DOF podlozi	41
Slika 6.2 Batimetrijska ploha na DOF podlozi	42
Slika 6.3 Prikaz bentičkih staništa na DOF podlozi.....	43
Slika 6.4 Bioportal.....	44

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Sažetak Simmonovih akustičnih podataka (Fisher i Simmons, 1977).....	11
Tablica 4.1 Tehničke specifikacije Teledyne Reson Seabat T20-P (Teledyne Marine, n.d.) ..	26
Tablica 4.2 Sažetak izvedbe (Trimble Applanix, n.d.).....	27
Tablica 4.3 Inercijalna mjerna jedinica (Trimble Applanix, n.d.).....	27
Tablica 4.4 Tehničke specifikacije za Valeport miniSVP (Valeport, n.d.)	28
Tablica 5.1 Vrijednosti kalibracijskih korekcija	33
Tablica 6.1 Statistički podaci karakteristika morskog dna.....	44

1. UVOD

Jadransko more je poluzatvoreno more u sastavu Sredozemnog mora, a upravo Hrvatska ima najdužu kopnenu obalu na Jadranu. Iako je malo i plitko, njegovo morsko dno je prekriveno raznim sedimentima. Pripada grupi toplijih mora. Danas je sve veća potražnja za batimetrijskim podacima plitkih voda. Višesnopnim dubinomjerom se prikupljaju podaci o topografijiorskog dna na način da se odaslani zvučni val odbije od dna i vrati u prijemnik. Za razliku od jednosnopnog dubinomjera, ovom tehnologijom je omogućena sto postotna pokrivenostorskog dna. Modeliorskog dna nastali ovom metodom pružaju informacije o dubini, strukturi i sastavu podmorja te se mogu koristiti u navigaciji, planiranju podvodne infrastrukture i u svrhu zaštite i očuvanja morskih staništa.

Propagacija zvučnih valova ovisi o nekoliko faktora. Tako ovisi o granicama medija kroz koje prolazi. Posebno je važno razumjeti granicu između zraka i vode. Prilikom prelaska zvučnog vala iz zraka u vodu ili obrnuto, značajno se mijenjaju brzina, frekvencija i intenzitet zvuka. Na granici medija, dio zvučne energije se reflektira, dok se preostali dio prenosi kroz medij. Reflektirani kut jednak je upadnom kutu, ali kut prolaska varira ovisno o omjeru brzina zvuka u dva medija, što se naziva refrakcija. Posebno treba spomenuti i zvučna atenuaciju koja predstavlja proces smanjenja intenziteta zvučne energije tijekom njenog prolaska kroz medij. Ona se može podijeliti na dva ključna procesa: apsorpciju i rasipanje. Apсорpcija se odnosi na pretvorbu zvučne energije u toplinsku energiju unutar medija, dok rasipanje podrazumijeva širenje zvučne energije u različitim smjerovima zbog nehomogenosti u mediju. Oba procesa igraju značajnu ulogu u smanjenju inicijalno odaslane zvučne energije, čime direktno utječu na jačinu i kvalitetu zvuka koji dopire do prijemnika.

U sklopu ovoga rada istražuje se biocenoza u blizini grada Splita, s posebnim naglaskom na ulogu i stanje posidonie oceanice u tom području. Ova biljka tvori guste podvodne livade koje služe kao stanište mnogim morskim organizmima, uključujući ribe, mekušce i rakove, te pruža hranu i zaklon brojnim vrstama. Analizom stanja livada posidonije i njihove interakcije s okolišem te identificiranjem ključnih vrsta koje ovise o ovom staništu, cilj je pridonijeti boljem razumijevanju i očuvanju biološke raznolikosti morskih ekosustava u Jadranu.

1.1. Metodologija

Za terensku izmjeruorskog dna, a u svrhu izrade batimetrije iz povratnog raspršenja, korišten je sljedeći instrumentarij: višesnopni dubinomjer Teledyne Reson Seabat T20-P, inercijalni navigacijski sustav Applanix POS MV Wavemaster i uređaj za mjerenje brzine zvuka u moru Valeport miniSVP. Podaci su prvo obrađeni u softveru Teledyne PDS, u kojem je izvršena i kalibracija dubinomjera, a zatim prebačeni u softver CARIS Hips & Sips u kojem se izvršila daljnja obrada. Posidonija, kamenje te sedimenti su uspješno odvojeni od ostalih podataka. Nakon toga, podaci su ubačeni u softver QGIS 3.16 te je izrađen prikaz staništa posidonije na području izmjere.

1.2. Motivacija

U današnje doba se javlja potreba za dubinskim istraživanjem i kartiranjem obalnih i pridnenih staništa u Republici Hrvatskoj, s posebnim naglaskom na staništa posidonije te raznih biocenoza. Kao ključne komponente morskog ekosustava, posidonija, kamenje i sediment igraju vitalnu ulogu u očuvanju biološke raznolikosti i stabilnosti okoliša. U kontekstu Republike Hrvatske, koja ima bogato pomorsko naslijeđe i značajna zaštićena područja, precizno mapiranje ovih staništa ključno je za njihovu zaštitu i održavanje, što doprinosi očuvanju nacionalnog prirodnog bogatstva i održivom upravljanju morskim resursima.

1.3. Hipoteza

Diplomski rad istražuje primjenu višesnopnog dubinomjera u vizualizaciji podmorja i točnost pozicioniranja u odnosu na druge metode. Podaci povratnog raspršenja signala dobiveni iz višesnopnog dubinomjera su ključno sredstvo u kartiranju morskog dna. Očekuje se da vjerodostojno prikazuju morsko dno, uz poseban naglasak na detekciju i distribuciju posidonije, što je važno za očuvanje i upravljanje morskim ekosustavima. Također treba istaknuti ekonomičnost ove metode pri izradi batimetrije.

1.4. Pregled dosadašnjih radova

Od velike količine srodnih radova koji se bave tematikom akustike i morskih ekosustava, posebno se ističu tri značajna djela. Prvo, knjiga 'Comparative Bioacoustics: An Overview' autora Wahlberg, M. i Larsen, O. N. (2017) predstavlja ključni izvor za razumijevanje utjecaja koji mogu uzrokovati pogreške u mjerenju akustičnih podataka. U poglavlju Propagation of Sound, autori detaljno objašnjavaju čimbenike poput varijacija u gustoći medija i prisutnosti buke koji mogu utjecati na točnost akustičnih mjerenja, pružajući duboko razumijevanje izazova u prikupljanju podataka. Osim toga, knjiga 'Pomorska geodezija' koju je napisao Pribičević, B. (2005) pruža ključne informacije o Jadranskom moru i specifičnostima vezanim uz pomorsku geodeziju. U ovom djelu, autor detaljno razrađuje upotrebu jednosnopnih i višesnopnih dubinomjera, koji su ključni instrumenti u akustičkoj metodi mjerenja dubina, te objašnjava kako njihova primjena doprinosi preciznosti u kartiranju morskog dna. Za kraj, rad 'Benthic Habitat Mapping: A Review of Progress Towards Improved Understanding of the Spatial Ecology of the Seafloor Using Acoustic Techniques' autora Brown, C. J., Smith, S. J., Lawton, P. i Anderson, J. T. (2011) nudi pregled napretka u kartiranju bentoskih staništa pomoću akustičkih tehnika. Ovaj rad naglašava važnost kartiranja morskih staništa i doprinos razumijevanju prostorne ekologije morskog dna, čime pomaže u očuvanju i upravljanju tim važnim ekosustavima.

1.5. Pregled sadržaja po poglavljima

Diplomski rad sastoji se od sedam poglavlja. U prvom poglavlju predstavljene su osnovni ciljevi i svrha rada, pružajući pregled ključnih informacija koje će biti razrađene u daljnjim poglavljima. Drugo poglavlje nudi pregled hidrografije kao znanstvene discipline i objašnjava osnovne koncepte podvodne akustike. Fokusira se na propagaciju zvuka kroz vodu i analizira pojave koje mogu uzrokovati pogreške u mjerenju. Treće poglavlje bavi se metodologijom kartiranja morskih staništa. Također se opisuje specifične karakteristike Jadranskog mora,

uključujući njegove ekološke i geografske osobitosti. U četvrtom poglavlju opisuje se terensko prikupljanje podataka u obalnom području Splita, uključujući korištenu opremu i tehničke specifikacije instrumenata te način prikupljanja i analize podataka. Peto poglavlje posvećeno je obradi prikupljenih podataka uz pomoć softverskih alata Teledyne PDS i CARIS Hips & Sips, objašnjavajući korake obrade, analize i pripreme podataka za daljnju interpretaciju. Šesto poglavlje pruža vizualizaciju rezultata kartiranja morskih staništa na Splitskoj obali, uključujući slike koje ilustriraju raspodjelu posidonije, kamenja i sedimenta. Na kraju, sedmo poglavlje nudi zaključak rada, raspravlja o važnosti rezultata za razumijevanje morskih staništa te daje preporuke za buduća istraživanja i očuvanje morskog okoliša.

2. HIDROGRAFIJA I OSNOVE PODVODNE AKUSTIKE

Hidrografija je grana primijenjenih znanosti koja se bavi mjerenjem i opisivanjem fizičkih obilježja oceana, mora, obalnih područja, jezera i rijeka, kao i predviđanjem njihovih promjena tijekom vremena. Osnovni cilj je osiguranje sigurnosti plovidbe te podrška svim ostalim morskim aktivnostima, uključujući gospodarski razvoj, sigurnost i obranu, znanstvena istraživanja i zaštitu okoliša (International Hydrographic Organization).

Hidrografija u širem smislu uključuje fizikalnu oceanografiju, marinsku oceanologiju i pomorsku (marinsku) geodeziju, a u temeljne zadaće pomorske geodezije spadaju:

- pozicioniranje na vodi,
- određivanje obalne linije,
- mjerenje dubina ili batimetrija,
- izrada navigacijskih informacijskih sustava.

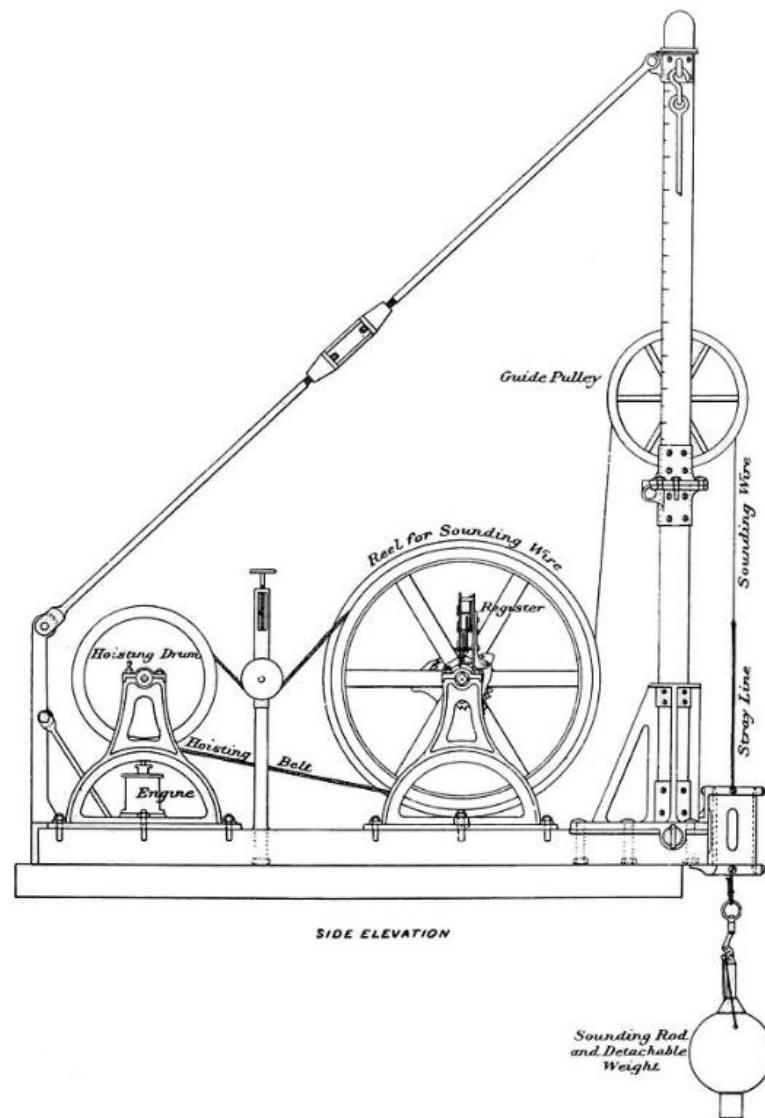
2.1. Hidrografija

Tek nakon dugog vremena od početka istraživanja svemirskih prostranstava, mjerenja udaljenosti i masa planeta od strane astronoma, počelo se s otkrivanjem tajni mora.

Poručnik Maury je osmislio i izradio inovativni uređaj za mjerenje dubine mora. Uređaj je imao olovno uže na koje je bio pričvršćen mali mehanički mehanizam za bilježenje broja okretaja tijekom spuštanja. Dobro je funkcionirao na umjerenim dubinama, ali nije bio uspješan u dubokom moru zbog poteškoća sa spuštanjem kada se koristilo dovoljno debelo uže koje bi zahtijevalo potrebnu snagu za izvlačenje. Plan rastezanja linije pod opterećenjem na njenom donjem kraju od površine do dna leži u osnovi metode koja se sada općenito koristi za mjerenje dubine mora. U plićaku se iz plovila spušta visak u obliku izduženog stošca pričvršćen na konopac podijeljen na stope ili hvati. Linija prolazi kroz ruke čovjeka koji osjeća trenutak kada visak dodirne dno i bilježi dubinu prema podjeli linije koja odgovara razini vode.

Mala šupljina u bazi olova napunjena je lojem, a količina pijeska, šljunka ili blata koju visak pokupi utisnuta je u loj, što daje indicaciju o karakteru dna. Gruba površina užeta predstavlja prepreku za slobodan prolaz kroz vodu, pa kako dubina raste, potrebno je koristiti teže utege kako bi linija brzo stigla do dna. Također, jače uže je potrebno da izdrži povećanu težinu olova. Upotrebom žice za sondiranje velikih dubina izbjegnute su mnoge poteškoće i nesigurnosti koje karakteriziraju upotrebu užeta, jer žica, budući da je male težine i malog poprečnog presjeka, nije pod velikim utjecajem podmorskih struja, ali omogućuje visku brz prolazak do dna.

Kada je projekt za atlantski telegrafski kabel učinio nužnim dobivanje točnih mjerenja dubine oceana, brodar Brooke iz mornarice Sjedinjenih Država poduzeo je prvi veliki korak u osiguravanju pouzdanih sredstava za sondiranje dubina mora. Izumio je uređaj u kojem je potapalo obavijalo cijev pričvršćenu na sondnu liniju. Pri udaru o dno, potapalo se odvajalo i ostajalo na dnu dok je cijev izvlačena na površinu. Ovaj izum omogućio je precizna mjerenja dubina, što je bilo ključno za uspjeh projekta atlantskog telegrafskog kabela (Littlehales, 1894).

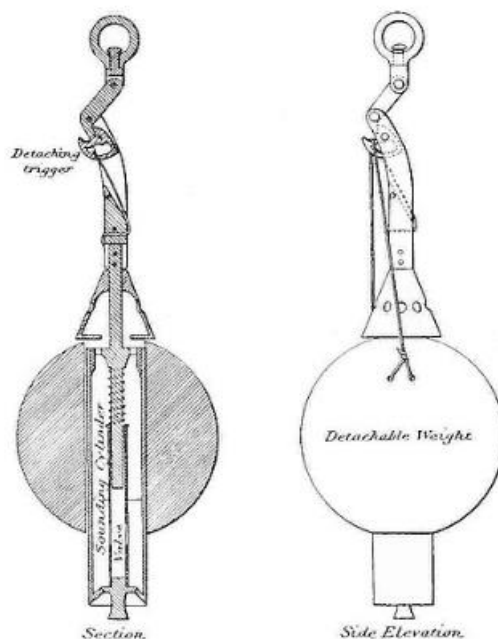


Slika 2.1 Stroj za sondiranje dubokog mora (Littlehales, 1894)

Moderni dubinski sondirajući cilindar (Slika 2.2), razvijen na temelju iskustva zapovjednika Sigsbeeja iz mornarice Sjedinjenih Država opremljen je ventilima na gornjem i donjem kraju koji se otvaraju prema gore. Tijekom spuštanja, ovi ventili dopuštaju vodi da slobodno prolazi kroz cilindar, čime se smanjuje otpor.

Pri udaru o dno, aktivira se okidač koji oslobađa vrpču koja podržava odvojivi teret. Dok se donji kraj sondirajućeg cilindra spušta u tlo, uzorak tla ulazi kroz donji ventil i zadržava se unutar cilindra. Kada se cilindar podiže, ventili na vrhu i na dnu zatvaraju se zbog svoje težine i tlaka vode, čime je uzorak zapečaćen. Po dolasku na površinu, uzorak se uklanja odvrtanjem

gornje i donje polovice cilindra radi pregleda. Ovaj dizajn omogućava precizno i učinkovito prikupljanje uzoraka tla s morskog dna, ključnih za daljnja istraživanja. Slika 2.1 prikazuje Sigsbeejev stroj za sondiranje dubokih mora (Littlehales, 1894).



Slika 2.2 Moderni sondirajući cilindar (Littlehales, 1894)

Leonardo da Vinci se često spominje kao prvi koji je predložio mogućnost korištenja zvuka za otkrivanje udaljenih brodova. Prva praktična primjena slijedi stoljećima nakon. Tijekom Prvog svjetskog rata saveznici su razvili pasivne sustave za detekciju koje su koristili kako bi se suočili s prijetnjom njemačkih podmornica. Upravljive slušalice bile su uronjene u vodu, omogućujući operateru da detektira izvore buke i locira njihov smjer.

Ideja da se prepreke i ciljne mete kod navigacije mogu otkriti aktivnim akustičkim sustavima posebno je potaknuta gubitkom Titanica 1912. godine (Lurton, 2002).

2.2. Osnove podvodne akustike

Jedno od najvećih tehnoloških dostignuća moderne povijesti bilo je razvoj sredstava komunikacije i prijenosa informacija na velikim udaljenostima. Većina ovih sustava koristi elektromagnetske valove koji su se pokazali kao moćan alat za prijenos informacija, kao i za istraživanje i praćenje našeg okoliša. Budući da se elektromagnetski valovi mogu širiti i u vakuumu i u atmosferi, njihova se domena primjene proširila općenitom uporabom telekomunikacija i satelita za daljinska istraživanja. No, veliki dio Zemlje ostaje nedostupan elektromagnetskim valovima. Više od 70% Zemljine površine zauzima podvodno područje te ono ne dopušta širenje radijskih i radarskih valova. Voda ima visoki stupanj vodljivosti, a time i veliku disipaciju, što znači da elektromagnetski valovi izuzetno brzo slabe te se time ograničava domet i korisnost. Akustični valovi su stoga jedini praktični način prenošenja informacija pod vodom, a predstavljaju mehaničke vibracije (Lurton, 2002). Kada akustični val prolazi kroz tvar, on lokalno uzrokuje promjene u gustoći medija i pomicanje mase. Taj pomak dovodi do stvaranja sila čiji je cilj vraćanje gustoće u stanje ravnoteže (Hovem, 2007).

Brzina širenja akustičnih valova je četiri do pet puta veća u vodi nego u zraku, mogu doseći puno više razine i što je najvažnije, podvrgnuti su manjem slabljenju i stoga se mogu širiti na velike udaljenosti. Glavni ograničavajući faktor je što korisni signali mogu biti poremećeni višom razinom okolne buke i neželjenim odjecima. Prva praktična realizacija i korištenje podvodnog zvuka došla je na vidjelo početkom 20. stoljeća. Broj i vrsta primjena od tada raste, a može se i reći da podvodna akustika danas igra istu bitnu ulogu koju imaju radar i radio valovi u atmosferi i svemiru.

Glavne primjene akustičnih valova su:

- otkrivanje i lociranje prepreka i ciljnih meta; ovo je primarna funkcija sonarnih sustava, uglavnom za vojne primjene, ali se također koristi u ribarstvu,
- mjerenje karakteristika morskog okoliša ili lokacije i brzine objekta koji se kreće pod vodom,
- odašiljanje poruka između podmornica i površinskih plovila ili naredbe daljinski upravljanim sustavima (Lurton, 2002).

Ovi sustavi su najvećim dijelom aktivni sustavi. Odašilju karakterističan signal te se on onda reflektirati na meti ili odašilju signal izravno do prijammnika. Postoje i pasivni sustavi koji služe samo za primanje signala.

Morska voda je u većem dijelu povoljna za propagaciju akustičnih signala, no ima svoja ograničenja:

- apsorpcije zvučnih valova u vodi uzrokuje slabljenje odaslanih signala, ograničavajući domet koji određeni sustav može postići,
- relativno mala brzina širenja (1500 m/s),
- poremećaji širenja vala zbog varijacija brzine zvuka i refleksije, uzrokuje nepravocrtno širenje vala,
- ambijentalni šum koji može nastati zbog kretanja morske površine, vulkanske i seizmičke aktivnosti, plovidbe, živih organizama te vlastita buka karakterističnu za akustični sustav i njegovu platformu itd.

Karakteristike propagacijskog medija variraju u prostoru i vremenu. Na fluktuacije utječu zemljopisne i sezonske varijacije u temperaturi i slanosti, reljef morskog dna, valovi, struje, plima i oseka i još mnogo drugih faktora. Zbog toga su podvodni akustični signali nasumičnog karaktera (Lurton, 2002).

Prema ranije navedenome, akustični valovi predstavljaju mehaničke vibracije. Promjene koje akustični val proizvede možemo usporediti s lancem opružnih elemenata s krutošću K i točkama s masom ρ . Kad je kraj lanca podvrgnut pomaku, ostatak lanca će također biti pomaknut ovisno o brzini određenoj krutošću opruge i težinom točaka s masom. Kad se opružni element duljine L komprimira malom duljinom ΔL , nastaje protuaktivna sila F jednaka:

$$F = K * \left(\frac{\Delta L}{L}\right) \quad (1)$$

gdje je K konstanta opruge. Mjerna jedinica sile i konstante opruge je njutn (N), a masa je raspoređena s ρ kilograma po jedinici duljine, mjereno u kg/m. Primjeni li se dimenzijska analiza, slijedi da se pomak širi brzinom:

$$c = (K/\rho)^{1/2} \quad (2)$$

Ovi se rezultati mogu primijeniti na širenje akustičnih valova u plinovima i tekućinama, gdje je K otpornost na promjenu volumena, čija je mjerna jedinica je njutn po kvadratnom metru (N/m^2) ili paskal (Pa), a ρ predstavlja gustoću medija, mjerenu u kilogramima po kubnom metru.

Primjenom tri jednostavna principa može se izvesti jednadžba akustičnog vala za tekućine i plinove:

1. Jednadžba kontinuiteta ili očuvanje mase,
2. Drugi Newtonov zakon,
3. Jednadžba stanja: odnos između promjena u tlaku i volumenu.

Iz navedenoga proizlazi linearna akustična valna jednadžba:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3)$$

gdje ∇^2 predstavlja Laplaceov operator, a c brzinu zvuka koja se može definirati kao:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}. \quad (4)$$

Otpornost na promjenu volumena i gustoća medija ovise o vanjskim uvjetima, tlaku i temperaturi. Brzina zvuka također ovisi i o lokaciji, pa tako varira s dubinom vode. Jednako važna varijabla je i brzina čestice u koja proizlazi iz drugog Newtonovog zakona (Hovem, 2007):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} * \Delta p. \quad (5)$$

Brzina zvuka je funkcija temperature, dubine i slanosti (Pionić, 2004):

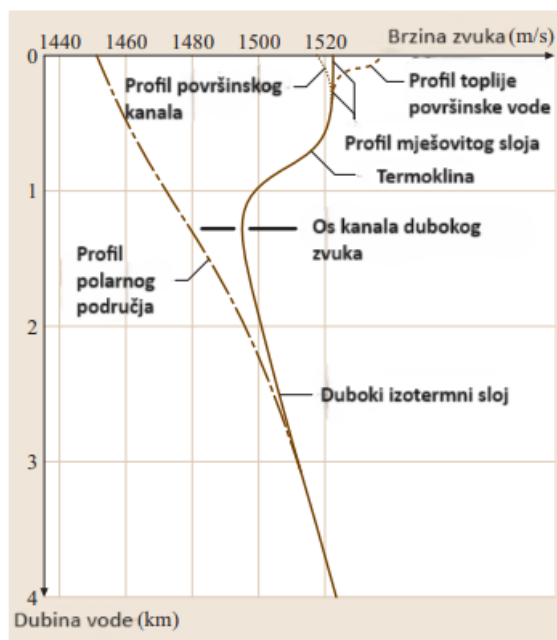
$$c = f(T, D, S). \quad (6)$$

Prema raznim literaturama, postoji nekoliko formula za računanje brzine zvuka u vodi. Sljedeća formula, iako je pojednostavljena, dovoljno je točna za većinu namjena:

$$c = 1448,6 + 4,618 * T - 0,0523 * T^2 + 1,25 * (S - 35) + 0,017 * D \quad (7)$$

gdje je c brzina zvuka izražena u metrima po sekundi (m/s), T je temperatura u Celzijevim stupnjevima ($^{\circ}C$), S je salinitet izražen u promilima, a D je dubina u metrima (m) (Hovem, 2007).

Slika 2.3 prikazuje set profila brzine zvuka s najvećom varijabilnosti blizu površine. Tijekom toplije sezone temperatura se povećava blizu površine, što rezultira povećanjem brzine zvuka prema morskoj površini. U nepolarnim regijama često se stvara sloj gotovo konstantne temperature. U ovom izotermalnom sloju brzina zvuka raste s dubinom zbog povećanja okolnog tlaka. Neposredno ispod nalazi se termoklina, gdje temperatura i, posljedično, brzina zvuka opadaju s dubinom. Ispod termokline temperatura ostaje konstantna, dok brzina zvuka raste zbog sve većeg okolnog tlaka (Kuperman i Roux, 2014).



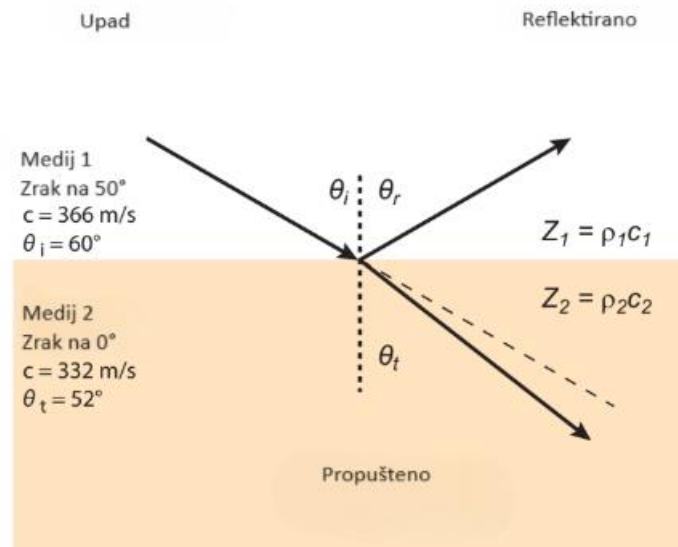
Slika 2.3 Profili brzine zvuka (prevedeno s engleskog na hrvatski, preuzeto i modificirano iz: Kuperman i Roux, 2014)

Propagacija zvučnih valova ovisi o granicama medija kroz koje prolazi. Kako bismo shvatili važnost istih, važno je prvo obratiti pozornost na granicu zrak-voda. Prilikom prelaska iz zraka u vodu ili obrnuto, neophodno je uzeti u obzir nekoliko fizičkih svojstava zvuka, budući da se brzina zvuka, njegova frekvencija i intenzitet značajno razlikuju u ovim medijima.

Kada zvučni val dođe na granicu između dva medija, dio upadne zvučne energije se reflektira od površine, dok se preostali dio prenosi kroz medij (Slika 2.4). Reflektirani kut, koji se mjeri između reflektirane zrake i normalne površine, jednak je upadnom kutu. Međutim, za zvučnu zraku koja prolazi kroz medij, kut prema normali varira ovisno o omjeru brzina zvuka u dva medija. Ovaj fenomen prijenosa zvuka pod kutom različitim od upadnog poznat je kao refrakcija. Snellov zakon sažeto opisuje refrakciju na površini:

$$\frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\theta_t)} = \frac{c_i}{c_t} \quad (8)$$

c_i predstavlja brzinu upadnog zvuka u mediju 1, dok je c_t brzina odaslanih zvukova u mediju 2. Napomenimo da je $c_i > c_t$, što implicira $\theta_t < \theta_i$. Međutim, kada je brzina zvuka veća u mediju 2 nego u mediju 1, tada je $\theta_t > \theta_i$.

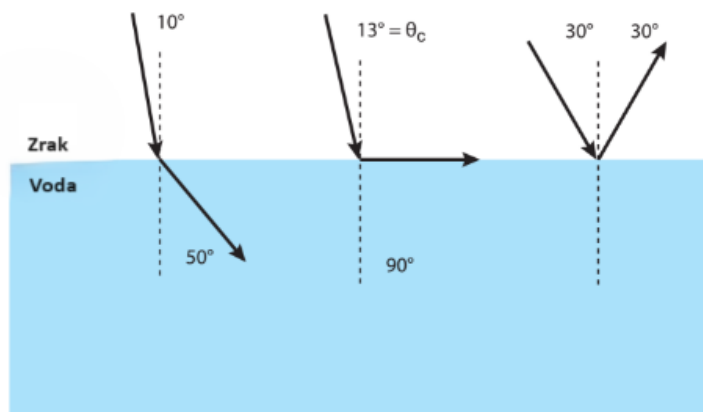


Slika 2.4 Snellov zakon refrakcije (prevedeno s engleskog na hrvatski, preuzeto i modificirano iz: Wahlberg i Larsen, 2017)

U potonjem scenariju, postoji određeni upadni kut pri kojem je refrakcijski kut 90° , što znači da je smjer refrakcijske zrake točno na granici između vode i zraka (Slika 2.5). Ovo je poznato kao kritični kut, iznad kojeg se sav upadni zvuk odbija, te nema prijenosa signala kroz medij. Kritični kut može se direktno izračunati iz:

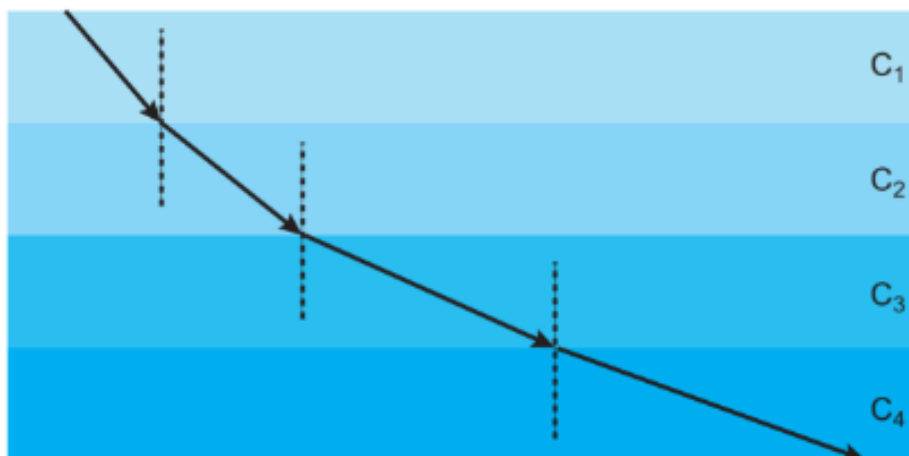
$$\theta_c = \sin^{-1} \left[\frac{c_i}{c_t} * \sin(90^\circ) \right] = \sin^{-1} \left[\frac{c_i}{c_t} \right]. \quad (9)$$

Kada je c_i brzina zvuka u zraku (340 m/s), a c_t brzina zvuka u vodi (1500 m/s), dobijamo da je $\theta_c = 13^\circ$. Ovaj kut predstavlja najveći upadni kut koji može rezultirati prijenosom signala iz zraka u vodu. Zvučni valovi koji udaraju na površinu vode pod upadnim kutovima većim od 13° reflektiraju se na površini, poznat fenomen kao totalna refleksija (Wahlberg i Larsen, 2017).



Slika 2.5 U slučaju da je upadni kut manji od kritičnog kuta, samo mali dio intenziteta upadnog zvuka će se prenijeti iz zraka u vodu. Međutim, za upadne kutove veće od kritičnog kuta dolazi do potpune refleksije, pri čemu se energija ne prenosi u vodu (prevedeno s engleskog na hrvatski, preuzeto i modificirano iz: Wahlberg i Larsen, 2017)

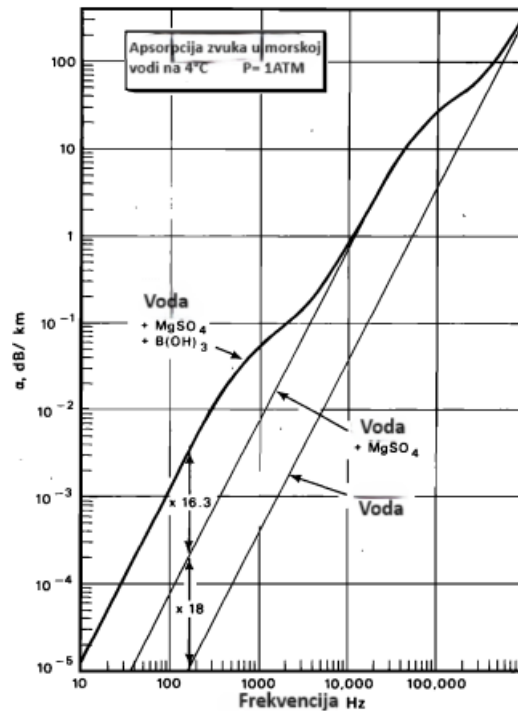
Navedeni rezultati mogu se primijeniti na općenitije stanje kada brzina zvuka u slojevima istog medija kontinuirano varira. Navedeno ilustrira Slika 2.6, gdje brzina zvuka raste postepeno s dubinom. Praktično pravilo koje se primjenjuje je da kada akustična zraka prolazi kroz područje gdje se brzina zvuka neprestano mijenja s dubinom, zvučni valovi će biti savijeni prema području niže brzine zvuka.



Slika 2.6 praćenje zraka u slojevitom mediju gdje se brzina zvuka povećava od jednog sloja do drugog, $c_1 < c_2 < c_3 < c_4$. Za svaki sloj kut refrakcije je veći od upadnog kuta (Wahlberg i Larsen, 2017)

Zvučna atenuacija može se podijeliti na dva procesa, apsorpcija i rasipanje, a oba procesa utječu na smanjenje inicijalno odaslane zvučne energije.

Apsorpcija zvuka u morskoj vodi je funkcija temperature, tlaka i frekvencije. Može se potvrditi Simmonsovim eksperimentom kojim je, pri atmosferskom tlaku, mjerena apsorpcija u morskoj vodi koja je posljedica borne kiseline i magnezijevog sulfata. Podaci o propagaciji akustičnog signala na velike udaljenosti, otkrili su postojanje povećane apsorpcije na niskim frekvencijama koja bi se mogla pripisati poznatom relaksacijskom procesu magnezijevog sulfata, kako prikazuje Slika 2.7. Magnezijev sulfat ima tendenciju da promijeni svoje stanje u području od 100 kHz, dok je relaksacija na niskim frekvencijama u području od 1 kHz. Nakon izvedbe eksperimenta, otkriveno je da borna kiselina pokazuje frekvenciju relaksacije u području od 1 kHz. Akustična istraživanja u laboratoriju Simmonsa potvrdila su da je borna kiselina doista uzrok dodatne apsorpcije u morskoj vodi na niskim frekvencijama (Tablica 2.1). Dakle, borna kiselina, zajedno s magnezijevim sulfatom, važan je faktor koji utječe na apsorpciju zvuka u morskom okolišu, posebno na nižim frekvencijama. Sama voda također doprinosi apsorpciji u morskoj vodi i postaje sve značajnija iznad 100 kHz.



Slika 2.7 Apsorpcija zvuka u morskoj vodi saliniteta = 35 ‰ i pH = 8,0 (prevedeno s engleskog na hrvatski, preuzeto i modificirano iz: Fisher i Simmons, 1977)

Tablica 2.1 Sažetak Simmonovih akustičnih podataka (Fisher i Simmons, 1977)

$T [^{\circ}\text{C}]$	$C [\text{m/s}]$	Borna kiselina			Magnezijev sulfat		
		$(\alpha, \lambda)_{\text{max}}$ $\cdot 10^5$	F_1 [kHz]	$A_1 \cdot 10^8$ (s/m)	$(\alpha, \lambda)_{\text{max}}$ $\cdot 10^5$	F_2 [kHz]	$A_2 \cdot 10^8$ (s/m)
4	1467	0,81	0,78	1,10	4,5	69	6,1
9	1487	0,91	0,90	1,22	4,3	86	5,8
20	1522	1,00	1,18	1,31	5,7	145	7,5
28,8	1543	0,96	1,41	1,24	6,1	185	7,9
36	1552	0,95	1,65	1,22	6,3	240	8,1

Opća jednadžba za koeficijent apsorpcije zvuka α_i , za jedan proces relaksacije je:

$$\alpha_i = \frac{\pi\beta_i}{\beta_0 c} * \frac{f_i f^2}{f_i^2 + f^2} m^{-1} \quad (10)$$

gdje je β_i kemijska stlačivost, β_0 izotermna stlačivost, c brzina zvuka u m/s, f_i frekvencija relaksacije, a f akustična frekvencija, oboje izraženo u Hz. β_i , β_0 , c i f_i su funkcije temperature, tlaka i saliniteta.

Kada je akustička frekvencija $f = f_i$, apsorpcija po valnoj duljini doseže maksimum i izražava se kao:

$$(\alpha_i \lambda)_{max} = \pi\beta_i/2\beta_0. \quad (11)$$

Određivanjem $(\alpha_i \lambda)_{max}$ i f_i apsorpcija uslijed procesa relaksacije može se opisati kao funkcija frekvencije ako je poznata brzina zvuka. Apsorpcija zvuka u morskoj vodi može se smatrati zbroj apsorpcije zbog borne kiseline (α_1), magnezijeva sulfata (α_2) i vode (α_3). Ukoliko se pretpostavi da su zbrojivi, totalni apsorpcijski koeficijent se može definirati kao:

$$A = A_1 P_1 f_1 f^2 / (f_1^2 + f^2) + A_2 P_2 f_2 f^2 / (f_2^2 + f^2) + A_3 P_3 f^2 m^{-1} \quad (12)$$

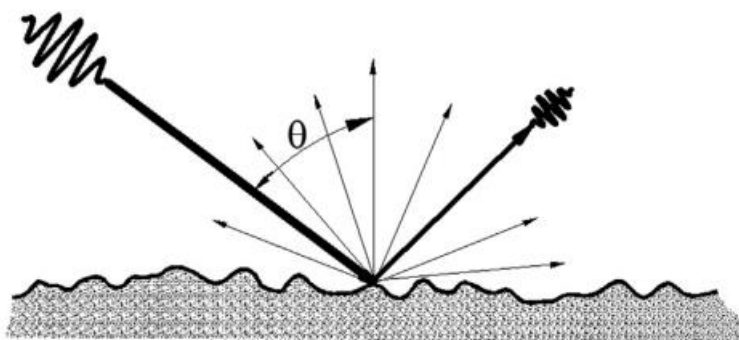
gdje A_i predstavlja atmosferski tlak, a P_i ovisnost tlaka o A_i (Fisher i Simmons, 1977).

More je puno nejednakosti koje se mogu nalaziti u vodenim stupcima, na površini ili na morskom dnu. Raspona su veličine od malih čestica prašine do oceanskih grebena. Kada se akustični val reflektira od ravne i glatke površine, zvučna energija se širi u jednom reflektiranom smjeru. Ukoliko se akustični val reflektira od nehomogene površine, ono se širi u svim smjerovima, što se naziva raspršenje. Udaljenost između dvije točke na hrapavoj, nehomogenoj površini, koje imaju slične karakteristike raspršenja, utječe na amplitudu i smjer širenja nekoherentne energije. Utjecaj hrapavosti površine na veličinu raspršenja se može opisati Rayleighovim parametrom R_a . On predstavlja omjer između korijena srednjeg kvadrata odstupanja visine hrapavosti h (m) od srednje visine i akustične valne duljine λ (m).

$$R_a = 2hk \cos \theta \quad (13)$$

gdje je $k=2\pi/\lambda$ akustični valni broj i θ kut incidencije (Slika 2.8).

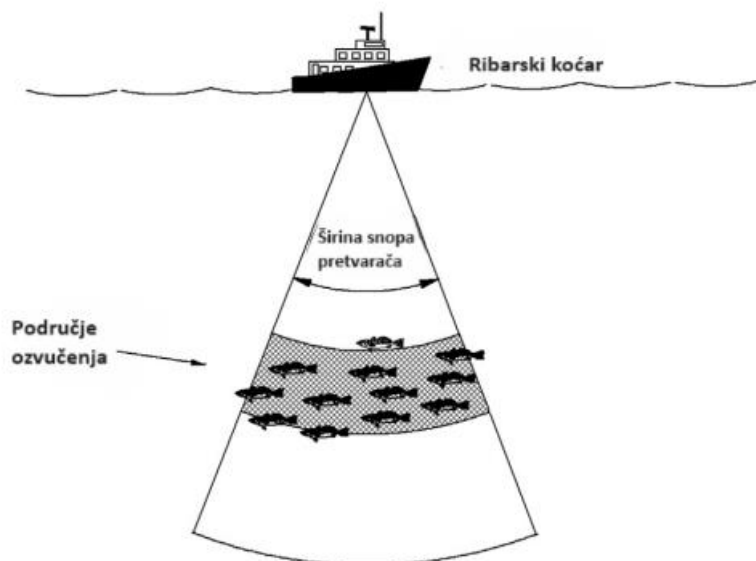
Za $R_a < 1$ utjecaj hrapavosti površine je slab te dolazi do vrlo malog raspršenja. Ukoliko je $R_a > 1$ utjecaj hrapavosti je velik te će većina energije biti raspršena neravnomjerno u svim smjerovima.



Slika 2.8 Ravni zvučni val pada na hrapavu površinu i raspršuje se na njoj (Bjørnø i dr., 2017)

Osim toga, u morskoj se vodi nalaze slobodni mjehuriće plina različite veličine, biomase poput fitoplanktona i zooplanktona, razne vrste riba i morskih sisavaca koji također utječu na raspršenje zvuka. Predstavnici biomasa, kao i ribe, sadrže i proizvode mjehuriće plina koji onda pridonose raspršenju zvuka (Slika 2.9). Raspršenje se opisuje pomoću parametra jačine raspršenja S . Jačina raspršenja je omjer u dB između intenziteta zvuka raspršenog jediničnom površinom ili jediničnim volumenom izmjerena na udaljenosti od 1 m od akustičnog središta površine ili volumena I_{sca} i intenziteta upadnog akustičnog vala I_{inc} (Bjørnø i dr., 2017):

$$S = 10 \log\left(\frac{I_{sca}}{I_{inc}}\right). \quad (14)$$



Slika 2.9 Riblje jato koje pridonosi raspršenju zvuka u volumenu (Bjørnø i dr., 2017)

Akustična energija raspršena unatrag prema sonaru naziva se raspršenje unatrag (eng. backscattering), dok se raspršenje u smjeru od sonara naziva raspršenje prema naprijed (eng. forward scattering). Za sonar koji radi u monostatskom načinu rada, važan je intenzitet odjeka, koji predstavlja ukupni intenzitet akustičnog signala vraćenog s cilja. Ovaj intenzitet sastoji se od intenziteta reflektiranog i povratno raspršenog signala. Razina odjeka je izražena kao:

$$EL = 10 \log\left(\frac{I_e}{I_r}\right) \quad (15)$$

gdje je I_e intenzitet odjeka primljen na monostatskom sonaru, a I_r referentni intenzitet.

Koeficijent refleksije intenziteta mete, R_t , definira se kao omjer između intenziteta odjeka, I_e , pri udaljenosti od 1 m od središta mete i intenziteta upadnog signala, I_{inc} , na metu, izražen kao:

$$R_t = \left(\frac{I_e}{I_{inc}}\right) \quad (16)$$

Ovisno o frekvenciji akustičnog signala, neke mete su male u odnosu na valnu duljinu i ponašaju se kao "točkaste mete". U takvim slučajevima, priroda mete je manje važna u usporedbi s karakteristikama akustičnog polja, širinom snopa, vremenskim profilom signala i udaljenosti do cilja. S druge strane, druge mete imaju dimenzije veće od širine akustičkog snopa, pa se zvukom obuhvaća samo dio mete. Koncept jakosti mete, TS, koji je izražen u decibelima, definira se kao:

$$TS = 10 \log\left(\frac{I_e}{I_{inc}}\right) \quad (17)$$

i ovisi o karakteristikama mete, geometriji, veličini i strukturi površine te o značajkama akustičnog signala kao što su frekvencija, kut upada na metu i širina snopa.

Mjerenje jakosti mete (TS) obično se provodi mjerenjem prosječnog intenziteta upadnog i povratno raspršenog signala, svedenih na vrijednosti na udaljenosti od 1 m od akustičkog središta mete. Budući da je često nemoguće provesti mjerenja na udaljenosti od 1 m od mete, povratno raspršeni signal se mjeri na većoj udaljenosti i zatim se pomoću sonar jednadžbe prilagodi intenzitet signala vrijednosti koja bi se očekivala na 1 m od akustičkog središta mete, koristeći odgovarajući izraz:

$$EL = SL - 2TL + TS \quad (18)$$

gdje je EL razina odjeka, SL je razina izvora, a 2 TL je gubitak prijenosa u oba smjera te je navedeno izraženo dB.

Snaga povratnog signala S_b može se definirati kao:

$$S_b = 10 \log\left(\frac{I_{bs}}{I_{inc}}\right) \quad (19)$$

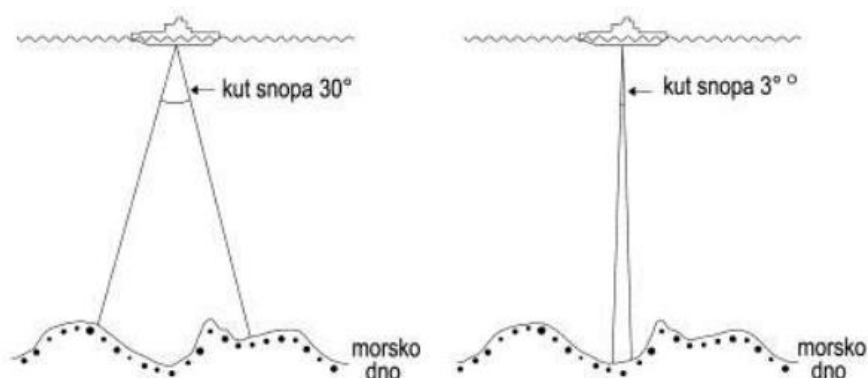
Monostatski način rada je najčešće korištena konfiguracija sonara. Eho sonari koji se primjenjuju u otkrivanju riba, batimetrijskom snimanju i za protukolizijske mjere rade u monostatskom načinu rada, koristeći signale koji se povratno raspršuju od objekata. Mete koje su karakteristične za morsko dno su olupine, kablov i cijevi, pojedinačne ribe ili jato riba te samo morsko dno (Bjørnø i dr., 2017).

2.3. Dubinomjeri

Akustični signali se najčešće primjenjuju u pomorskim istraživanjima za mjerenje batimetrije u plitkim i dubokim vodama, koristeći jednosnopne (Singlebeam echosounder, SBES) i

višesnopne dubinomjere (Multibeam echosounder, MBES). Za precizna batimetrijska mjerenja se koristi vrijeme putovanja signala, a intenzitet i oblik primjenog signala pružaju informacije o sastavu morskog dna (Amiri-Simkooei i dr., 2011).

U svojoj knjizi Pribičević (2005) navodi da je širina snopa jednosnopnog dubinomjera oko 30° , no u prošlosti su se koristili i uskosnopni dubinomjeri čija je širina snopa iznosila $\beta = 2\theta \leq 5^\circ$. Kut θ u ovome slučaju predstavlja kut snopa (Slika 2.10).



Slika 2.10 širokosnopni i uskosnopni dubinomjer (Pribičević, 2005)

Uskosnopni dubinomjeri su time najprikladniji za mjerenje dubina izravno ispod plovila, izbjegavajući time pogreške uzrokovane nagnutim morskim dnom, te za povećanje kvalitete podataka u rezoluciji i točnosti. Glavni nedostatak je što ne pružaju informacije o topografiji sa strane broda te se zbog toga ponekad koriste u kombinaciji sa širokosnopnim dubinomjerima.

Rezolucija dubinomjera definira se kao sposobnost razlikovanja dvaju bliskih odvojenih objekata na dnu. U vertikalnom smislu, rezolucija je određena s trajanjem emitiriranog pulsa i može se izračunati sljedećom formulom (Pribičević, 2005):

$$\delta z = \frac{cT}{2}. \quad (20)$$

Ukoliko je korišten modulirani signal, rezolucija je dana kao:

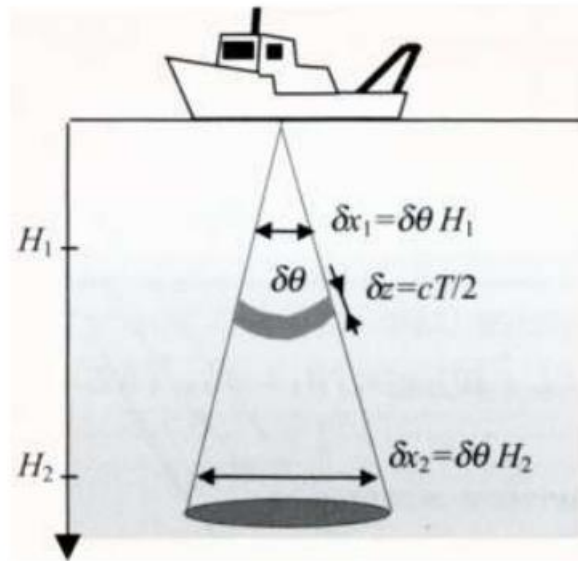
$$\delta z = \frac{c}{2B} \quad (21)$$

gdje B predstavlja moduliranu širinu snopa.

Druga vrsta rezolucije je horizontalna rezolucija, koja je povezana s kutnom širinom odaslanog snopa te dana formulom (Pribičević, 2005):

$$\delta x = 2 \tan\left(\frac{\delta\theta}{2}\right) H \approx \delta\theta H. \quad (22)$$

Slika 2.11 prikazuje vertikalnu i horizontalnu rezoluciju jednosnopnog dubinomjera.



Slika 2.11 vertikalna i horizontalna rezolucija jednosnopnog dubinomjera (Pribičević, 2005)

Višesnopni dubinomjeri se koriste kada je potrebno dobiti bolju pokrivenost dna od one koja se može postići jednosnopnim dubinomjerom. Glavna prednost je ostvarenost 100%-tne pokrivenosti uz malu cijenu. Pribičević (2005) navodi kako im točnost nije ništa bolja od točnosti jednosnopnog dubinomjera, no povećana je produktivnost. Postoje dvije skupine višesnopnih dubinomjera, a to su swath i sweep sustavi.

Swath sustav koristi jedan odašiljač koji emitira više zvučnih snopova prema morskom dnu. Ti zvučni snopovi pokrivaju široko područje morskog dna, omogućujući detaljno i efikasno kartiranje velikih površina u jednom prolazu broda. Također se može koristiti i dvostruki odašiljač ili odašiljač i prijammnik odvojeno. S druge strane, sweep sustav se sastoji od više jednosnopnih dubinomjera postavljenih u niz na platforme sa svake strane broda.

Budući da se višesnopni dubinomjeri najčešće koriste s površine, njihova sposobnost dosega varira ovisno o dubini, bilo da se radi o oceanima ili plitkim vodama. Odabir sonarne frekvencije treba prilagoditi dubini radi optimizacije učinkovitosti dosega. Također je ključno održavanje adekvatnog omjera signala i šuma (SNR). Komponenta ovisna o dometu uključuje geometrijsku komponentu, koja nije ovisna o frekvenciji, i komponentu atenuacije puta, koja ovisi o frekvenciji. Zbog toga se niže frekvencije, koje imaju manju atenuaciju, koriste u dubljim vodama (Hughes Clarke, 2018).

Swath višesnopni dubinomjer emitira zvučni impuls u obliku široke lepeze u jednom smjeru. Široki impuls pokriva veliko područje morskog dna ispod broda, stvarajući široki snimak tog područja. Kada se zvučni signal odbije od morskog dna i vrati natrag, odašiljač prima povratni signal i dijeli široki snimak na manje snimke. Širina tih manjih snimaka obično je od jednog do nekoliko stupnjeva, ovisno o specifičnom sustavu koji se koristi (Slika 2.12).



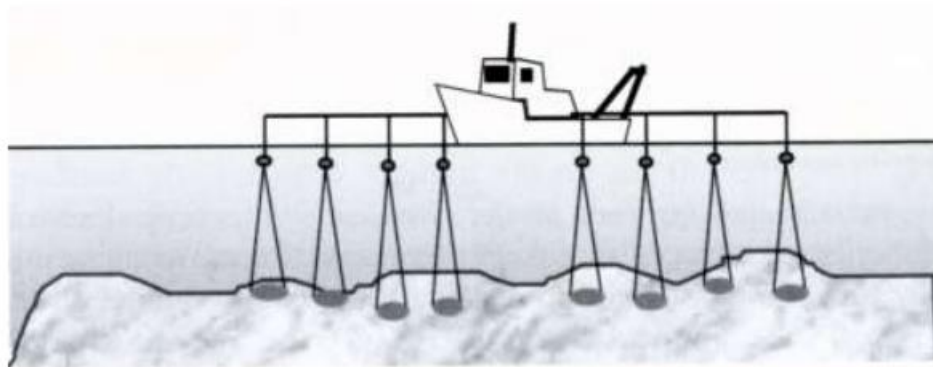
Slika 2.12 Višesnopni dubinomjer (Pribičević, 2005)

Glavna prednost swath sustava, u usporedbi sa sweep sustavom je u tome što se ostvaruje bolja pokrivenost u plitkim vodama, a u dubokim vodama, ovisno o specifikacijama dubinomjera, pokrivenost može biti i veća od dubine vode.

Prilikom mjerenja može doći do različitih pogrešaka, a neke od najvažnijih su (Pribičević, 2005):

- pogreške mjernog sustava zbog elektronike,
- pogreška mjerenja dubina zbog širine snopa,
- pogreška kuta snopa,
- pogreške širenja zvuka,
- pogreške ljuľanja, posrtanja i zakretanja broda,
- pogreška nehorizontalnosti odašiljača,
- vertikalni pomak, dinamičke promjene površine vode,
- pogreške kod kalibracije sustava,
- plima i oseka.

Sweep sustav čine jednosnopni dubinomjeri smješteni u nizu, postavljeni na oplati okomito na plovilo (Slika 2.13). Njihova najveća primjena je u uskim vodenim područjima kao što su luke ili kanali, a potpuna pokrivenost područja je ovisna o razmaku između odašiljača i dubini vode. Zbog kompleksnosti izvedbe, korištenje sustava je ograničeno na luke i kanale.



Slika 2.13 Sweep sustav (Pribičević, 2005)

3. JADRANSKO MORE I KARTIRANJE MORSKIH STANIŠTA

Jadransko more, između Italije i Balkanskog poluotoka, poznato je po svojoj bistrini i biološkoj raznolikosti. Kartiranje morskih staništa u ovom području ključno je za očuvanje ekosustava, omogućujući praćenje promjena, zaštitu vrsta i održivo upravljanje prirodnim resursima.

3.1. Kartiranje morskih staništa

Morski okoliš pod sve je većim utjecajem ljudskih aktivnosti poput ribolova, rudarstva i zagađenja, što uzrokuje ozbiljnu štetu ekosustavima i smanjuje bioraznolikost. Bez hitnih mjera, predviđa se da će do sredine 21. stoljeća komercijalne zalihe ribe i morskih plodova pasti do nepopravljive razine. Procjenjuje se da niti jedan dio oceana na globalnoj razini nije neokrnut ljudskim utjecajem, a samo 5-10% morskog dna je kartirano s dovoljnom rezolucijom.

Izrada karata morskog dna započela je u 13. stoljeću, kada su pomorski trgovci izrađivali karte za Sredozemno more. Kartiranje batimetrije oceanskog dna nastavlja se do danas, posebno u plitkim obalnim područjima gdje promjene u batimetriji mogu ugroziti plovidbu. Geološka i biološka istraživanja morskog dna započela su u devetnaestom stoljeću, s primitivnim alatima za uzorkovanje. Danas se koriste sofisticiranije metode, ali poteškoće s uzorkovanjem u obalnom okruženju i dalje ograničavaju naše razumijevanje. Konvencionalne metode pružaju detaljne informacije o malim područjima, ali je teško dobiti točan prikaz šire prostorne konfiguracije bez opsežnih i skupih istraživanja. Razvoj zračnih i satelitskih tehnika daljinskog snimanja posljednjih desetljeća omogućio je široku dostupnost optičkih podataka daljinskog istraživanja za ekološka istraživanja. Međutim, primjena tih tehnika u morskim sustavima ograničena je na plitka obalna područja zbog slabije penetracije svjetlosti kroz morsku vodu, što ostavlja većinu morskog dna izvan dosega. Tek razvojem akustičnih tehnologija poput bočnog sonara i višesnopnog dubinomjera znanstvenici su počeli dostizati visoku kvalitetu i rezoluciju sličnu tradicionalnom kartiranju kopnenog područja (Brown i dr., 2011).

U svome radu Brown i dr. (2011) navode kako je kartiranje morskih staništa nedavno definirano kao „određivanje rasprostranjenosti i obuhvata staništa kako bi se stvorila karta koja u potpunosti pokriva morsko dno te prikazuje jasne granice između susjednih staništa”. Ova definicija pretpostavlja da za prostorno predstavljanje bioloških uzoraka moramo uspostaviti jasne granice između susjednih vrsta staništa.

Desetljećima su morski geolozi koristili akustične podatke za izradu karata morskog dna, podijelivši ga na prostorne jedinice s jasnim granicama koje označavaju različite karakteristike sedimenta ili oblika dna. Ranije karte staništa razvijene su na temelju ovog geološkog pristupa, uključujući biološke podatke dobivene iz uzoraka na licu mjesta. Također postoje i nekontinuirane granice između karakteristika morskog dna, no primjećuju se postupne promjene u tim karakteristikama. U većini se slučajeva karte izrađuju interpretacijom neprekidne pokrivenosti podataka o okolišu, dobivenih iz daljinskog snimanja, te se uz navedeno koristi i biološka informacija o staništima dobivena iz uzoraka morskog dna. Proces potvrđivanja uzorkuje samo mali dio morskog dna, stoga se cjelokupna raspodjela staništa određuje na temelju povezanosti između podataka o okolišu dobivenih daljinskim snimanjem i uzoraka prikupljenih na terenu. Na taj način, konačna karta predstavlja predviđanje gdje se staništa nalaze na morskom dnu, pri čemu se podaci o okolišu koriste kao indikatori za staništa, budući da se ne može direktno uzorkovati cijelo područje (Brown i dr., 2011).

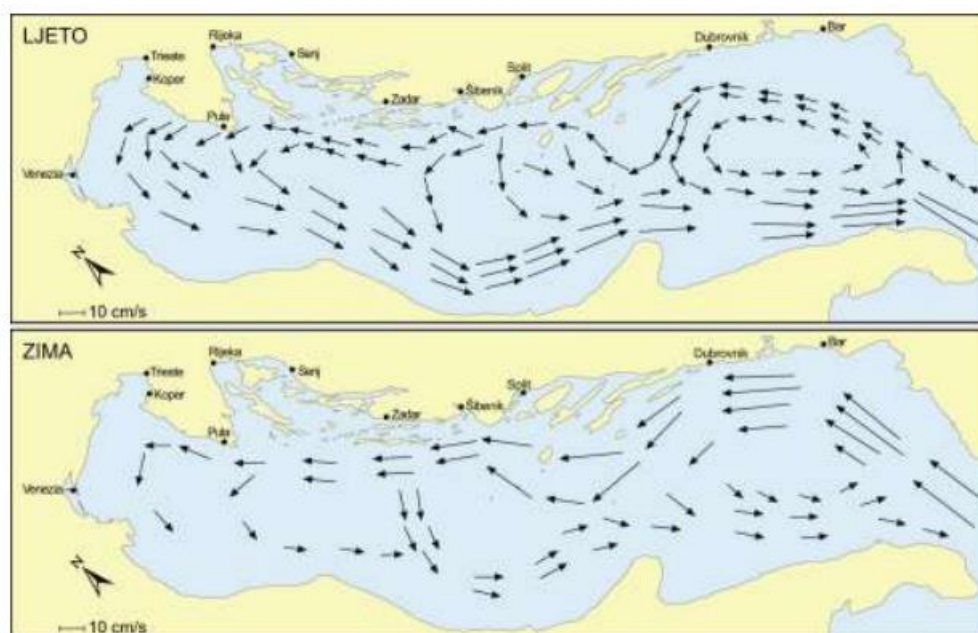
3.2. Jadransko more

Jadransko more spada u tip poluzatvorenih mora, relativno je malo i nalazi se u sastavu Sredozemnoga mora. Smješten je između Balkanskog i Apeninskog poluotoka (Slika 3.1). Razlikujemo dvije zone Jadranskog mora, vanjsku i obalnu zonu. Obalna zona je obuhvaća područje unutar zaljeva i kanala gdje je morsko dno prekriveno mješovitim sedimentima. S druge strane, vanjska zona obuhvaća područje od vanjskih granica otoka prema otvorenom moru. U navedenoj je zoni dno na sjeveru prekriveno pijeskom, a na jugu mješavinom pjeska, mulja i silta (Pribičević, 2005).



Slika 3.1 Jadransko more (URL 1)

Pribičević (2005) u svojoj knjizi navodi da površina Jadranskog mora iznosi 138595 km², a pošto ga karakterizira i velik stupanj razvedivosti obale, ukupna duljina obalne crte iznosi 5835,3 km.



Slika 3.3 Prikaz morskih struja Jadranskog mora ljeti i zimi (Pribičević, 2005)

Na Jadranu prevladava mediteranska klima s dominantnim vjetrovima jugom i burom u jesenskim i zimskim mjesecima te maestralom u ljetnim mjesecima. Bura je hladan vjetar, a puše iz smjera sjeveroistoka, a jugo je vlažan i topao vjetar i puše iz smjera jugoistoka. Maestral se povezuje s lijepim vremenom i puše u ljetnim mjesecima (Pribičević, 2005).

Morska trava je prepoznata kao ključni ekosustav u plitkim obalnim vodama, a zbog njezine rasprostranjenosti i osjetljivosti na promjene u okolišu koristi se i kao pokazatelj kvalitete mora. *Posidonia oceanica* je najzastupljenija morska trava u Sredozemnom moru (Slika 3.4). Sposobnost posidonije da služi kao pokazatelj različitih ekoloških promjena očituje se u tri razine (Montefalcone, 2009):

- individualna razina,
- populacijska razina,
- zajednička razina.

Na individualnoj razini, fenologija biljke pruža informacije o njenom zdravlju. Struktura i morfologija livade *P. Oceanica* pružaju karakteristične indikacije o okolišnim uvjetima na populacijskoj razini. Zajedničku razinu karakterizira flora i fauna koje su povezane s posidonijom i također reagiraju na promjene u okolišu te time daju širu procjenu ekološkog stanja.



Slika 3.4 *Posidonia oceanica* (Bakran-Petricioli, 2007)

Posidonija se nalazi u obalnim područjima pod snažnim utjecajem ljudskih aktivnosti koje mogu izravno oštetiti livade ili neizravno utjecati na kvalitetu vode i sedimenta. Na Jadranu, često tvore prostrane livade koje se protežu od površine do dubine od četrdesetak metara, a u tim ekosustavima se često nalazi i plemenita periska (Bakran-Petricioli, 2007). Slika 3.5 prikazuje naslage lišća posidonije na obali.



Slika 3.5 Naslage lišća posidonije na obali (Bakran-Petricioli, 2007)

4. TERENSKO PRIKUPLJANJE PODATAKA

Terenska izmjera je obavljena 12. lipnja 2024. u Splitu. Na vrhu kabine broda su postavljene dvije GNSS antene, a na bočnoj strani broda montiran je višesnopni dubinomjer Teledyne Reson Seabat T20-P s inercijalnom mjernom jedinicom (IMU). Idealno mjesto za montažu opreme je blizu središta plovila, što će smanjiti utjecaj naginjanja i ljuljanja. IMU zajedno s GNSS antenama čini inercijalni navigacijski sustav (INS) za pozicioniranje, a korišteni INS je Applanix POS MV Wavemaster. Za izračun brzine zvuka u vodi korišten je Valeport miniSVP.

Slika 4.2 prikazuje višesnopni dubinomjer montiran na strani broda, a Slika 4.3 demontažu opreme s broda.

4.1. OPREMA

Za terensku izmjeru u Splitu korištena je sofisticirana oprema koja omogućuje precizno mjerenje i pozicioniranje. U ovom poglavlju bit će detaljno navedene tehničke specifikacije opreme.

4.1.1. Višesnopni dubinomjer

Višesnopni dubinomjer korišten u svrhu prikupljanja podataka je Teledyne Reson Seabat T20-P (Slika 4.1).

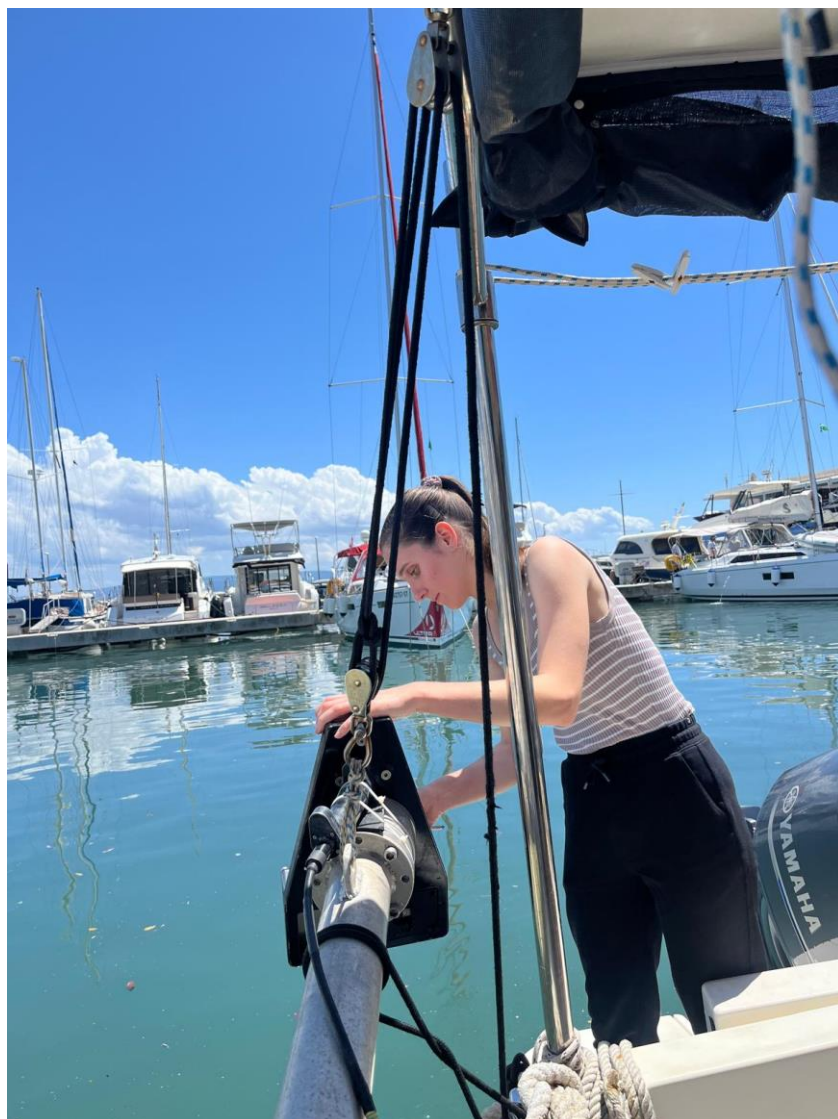
S prijenosnim SeaBat sonar procesorom, vrijeme mobilizacije je smanjeno kako bi se mogli usredotočiti na obavljanje posla. T20-P, koji radi na frekvenciji od 200 kHz do 400 kHz, je potpuno prilagodljiv za širok raspon primjena i koristi kompaktne, lagane odašiljače u konfiguraciji $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Vodootporan je i omogućuje precizno bilježenje vremena kada su podaci prikupljeni (URL 2). Tablica 4.1 prikazuje daljnje tehničke specifikacije.



Slika 4.1 Teledyne Reson Seabat T20-P (URL 2)



Slika 4.2 Višesnopni dubinomjer montiran na strani broda (izvor: Lovro Klarić)



Slika 4.3 Demontaža opreme s broda (izvor: Lovro Klarić)

Tablica 4.1 Tehničke specifikacije Teledyne Reson Seabat T20-P (Teledyne Marine, n.d.)

Ulazni napon	100-230VAC 50/60 HZ	
Snaga	200W/300W	
Radna temperatura	-5°C do +45°C	
Temperatura prilikom pohrane	-30°C do +70°C	
Zaštita	vodootporan (IP54)	
Raspon frekvencije	400kHz (maks. frekvencija)	200kHz (min. frekvencija)
Širina poprečnog snopa	1°	2°
Širina uzdužnog snopa	1°	2°
Tipična dubina (CW²)	0,5-150 m	0,5-375 m
Maksimalna dubina (CW²)	250 m	550 m
Broj snopova	min. 10, maks. 1024	
Broj očitavanja	do 50 očitavanja/s	
Duljina pulsa (CW)	15-300 μs	
Rezolucija dubine	6 mm	
Ocjena dubine	50 m	

4.1.2. Inercijalni navigacijski sustav

Inercijalni navigacijski sustav Applanix POS MV Wavemaster korišten u svrhu pozicioniranja se sastoji od IMU i dvije GNSS antene (Slika 4.4).

Applanix POS MV dokazao se u svim uvjetima te je najpoželjnije rješenje za georeferenciranje i kompenzaciju pokreta kod hidrografskih stručnjaka. POS MV kombinira GNSS podatke s podacima o kutnoj brzini i ubrzanju iz IMU-a te smjerom iz GNSS sustava za mjerenje azimuta (GAMS) kako bi proizveo pouzdano i precizno rješenje za poziciju i orijentaciju (URL 3). Tablica 4.2 i Tablica 4.3 prikazuju daljnje specifikacije.



Slika 4.4 Inercijalni navigacijski sustav Applanix POS MV Wavemaster (URL 3)

Tablica 4.2 Sažetak izvedbe (Trimble Applanix, n.d.)

Sažetak izvedbe	DGNSS	Točnost nakon ispada GNSS-a od 60 s
Pozicija	0,5 – 2 m ²	9 m za ispad od 60 s (RTK) 3m za ispad od 30 s (RTK) 2 m za ispad od 60 s (IAPPK)
Ljuljanje i posrtanje	0,03°	0,04°
Smjer kretanje	0,015° s baznom linijom od 4 m 0,03° s baznom linijom od 2 m	< 2° po satu degradacije
Uzdizanje	5 cm	5 cm
Stvarno uzdizanje	2 cm	2 cm

Tablica 4.3 Inercijalna mjerna jedinica (Trimble Applanix, n.d.)

IMU			
Kućište	dimenzije	težina	temperatura
Između paluba	L= 158 mm, W= 158 mm, H=124 mm	2.5 kg	-40 °C to +60 °C
Potopljeno	Ø100 mm X 104 mm ⁷	2.7 kg	-40 °C to +60 °C

4.1.3. Valeport miniSVP

Valeport miniSVP korišten je za mjerenje brzine zvuka na različitim dubinama u vodenom stupcu. Ručno je spuštana s broda do morskog dna. Tijekom spuštanja, mjerena je brzina zvuka kroz vodeni stupac što je ključno za preciznu primjenu podvodne akustike. Osim navedenih prikupljenih podataka, prikupljeni su i podaci o temperaturi i tlaku. Slika 4.5 prikazuje Valeport miniSVP korišten na terenu, a Tablica 4.4 tehničke specifikacije instrumenta.



Slika 4.5 Valeport miniSVP (izvor: Lovro Klarić)

Tablica 4.4 Tehničke specifikacije za Valeport miniSVP (Valeport, n.d.)

Senzori	Senzor brzine zvuka, PRT temperaturni senzor, mjerac tlaka	Pohrana	možućnost pohrae više od 10 milijuna linija podataka (ekvivalentno 10 000 profila na 500 m, pri rezoluciji profila od 1 m).
Domet brzine zvuka	1375 – 1900 m/s	Baterija	90 sati rada
Rezolucija brzine zvuka	0,001 m/s	Snaga	<250 mW
Točnost brzine zvuka	± 0,02 m/s	Materijal	Kućište od acetala ili titana, senzor od polikarbonata i kavez za postavljanje od nehrđajućeg čelika
Raspon temperature	-5°C do +35°C	Dubina	500m (acetal) 6000 m (titan)
Raspon tlaka	5, 10, 30, 50, 100, 300 ili 600 Bar	Težina	0,8 kg (acetal) 1,6 kg (titan)

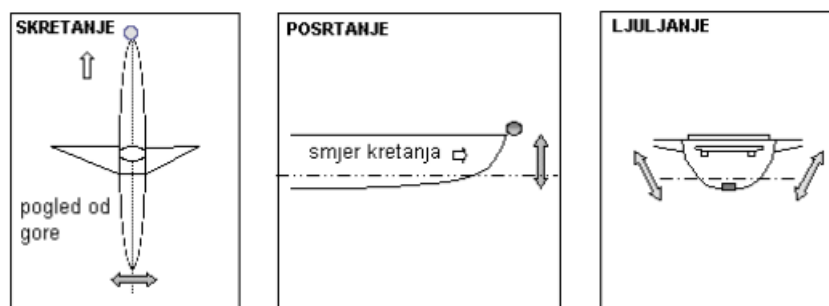
5. OBRADA PODATAKA

Za obradu podataka korišteni su programi Teledyne PDS i Caris Hips & Sips. Teledyne PDS je također korišten u svrhu kalibracije instrumentarija, Patch test.

5.1. Patch test i Teledyne PDS

Patch test je ključan za kalibraciju višesnopnih sustava. On identificira montažne greške i vremenska kašnjenja te korigira kutne pogreške poput ljuljanja, posrtanja i skretanja (Slika 5.1). Ova procedura osigurava točnost mjerenja podataka o dubini i položaju na terenu (Pribičević, 2005).

Kako bi se mogla provjeriti točnost višesnopnog dubinomjera, prvo je potrebno odrediti područje kalibracije, na kojem su izvedene tri linije snimanja. Područje kalibracije u ovome slučaju nije isto kao i područje terenske izmjere. Ono mora biti relativno ravnog morskog dna i prepoznatljivim značajkama. Prva linija je izvedena tako da prekriva ciljano područje morskog dna. Druga linija je izvedena u suprotnom smjeru, tako da pokriva isto područje. Treća linija se izvodi na određenoj udaljenosti, paralelno od prve dvije, no prikupljeni podaci se djelomično preklapaju kako bi se osigurala bolja pokrivenost. Korekcije su izračunate na terenu kako bi se omogućila pravovremena reakcija na sve nedostatke ili probleme (Slika 5.2).

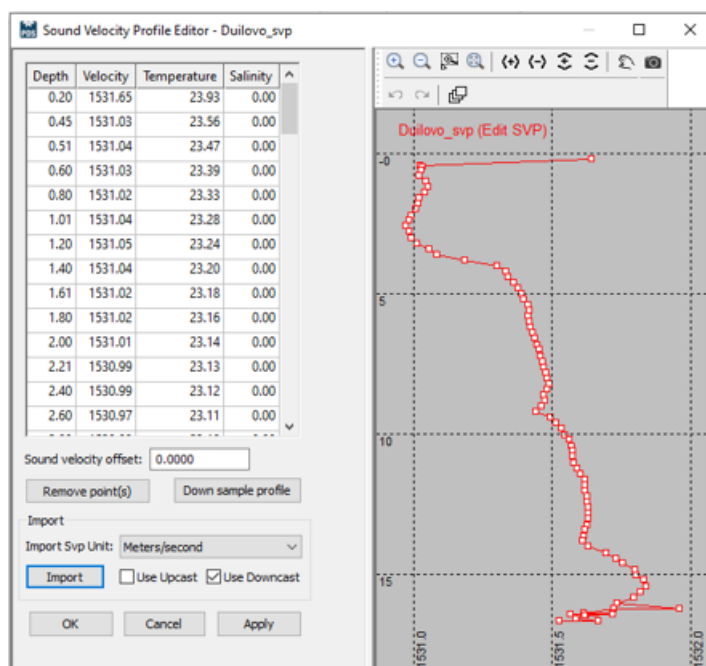


Slika 5.1 Kutevi skretanja, posrtanja i ljuljanja (Pribičević, 2005)



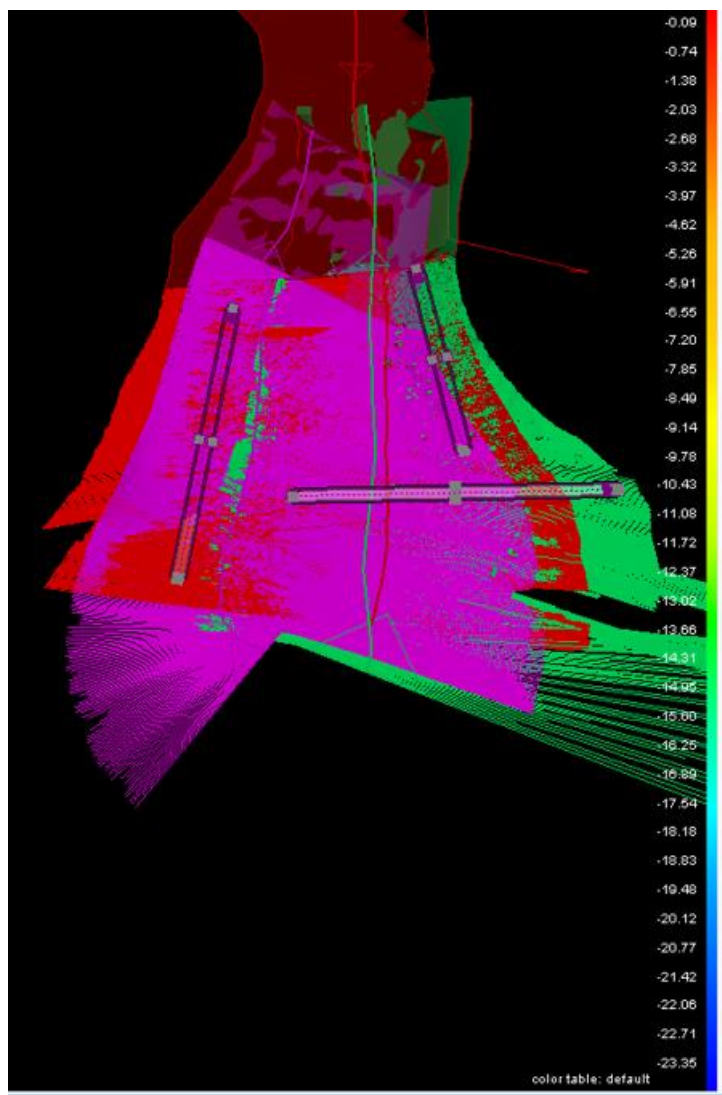
Slika 5.2 Računanje korekcija u programu Teledyne PDS (izvor: Lovro Klarić)

Prije provedbe kalibracije, u softver Teledyne PDS prvo je učitana .svp datoteka s podacima o profilima brzine zvuka u moru (Slika 5.3)

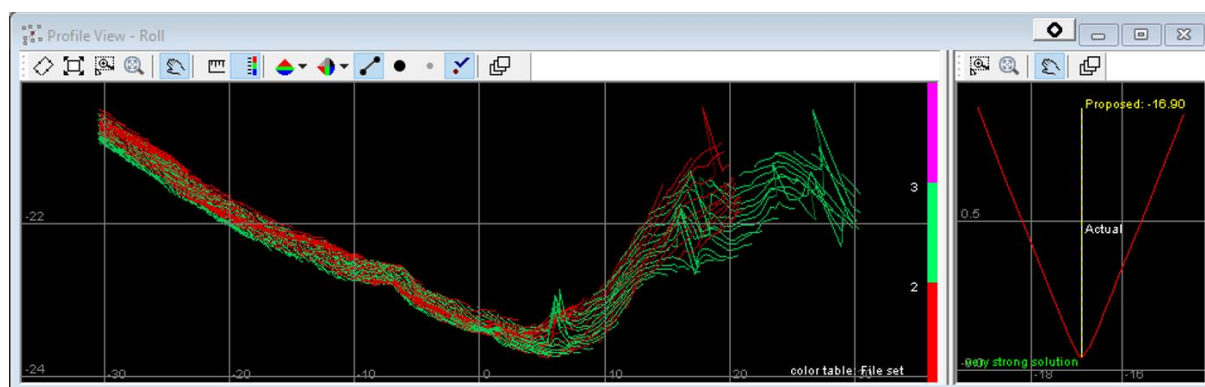


Slika 5.3 Sound Velocity Profile Editor

Prilikom provedbe kalibracije, potrebno je definirati tri profila (Slika 5.4). Profil ljuljanja je definiran okomito na linije snimanja, a vršena je i prilagodba profila sve dok rješenje nije bilo zadovoljavajuće. Slika 5.5 prikazuje profil ljuljanja te vrlo jako rješenje kvalitete.

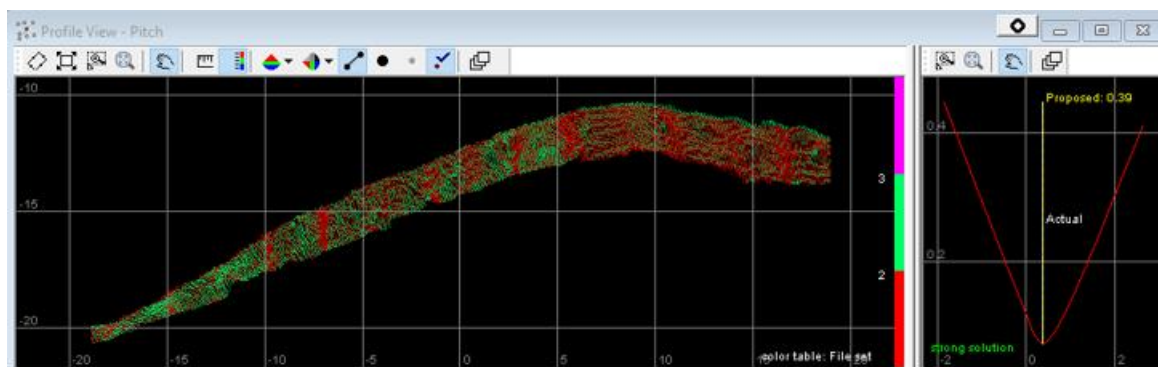


Slika 5.4 Definiranje profila



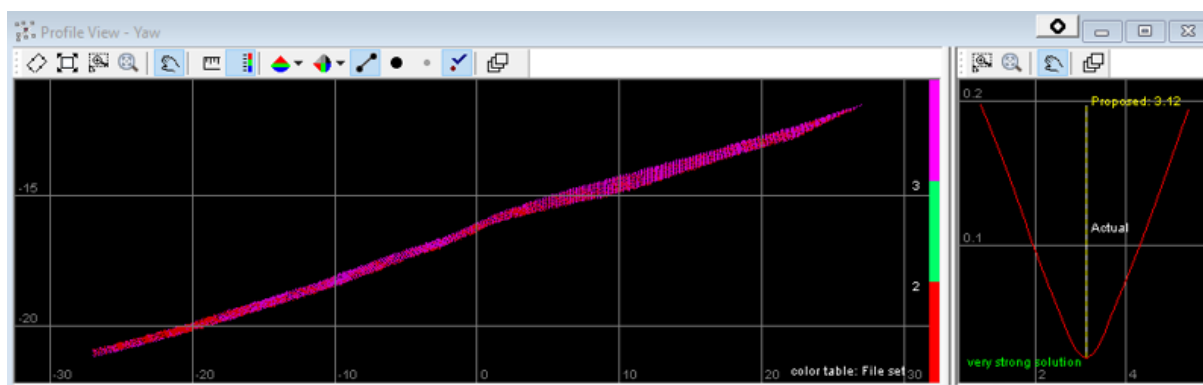
Slika 5.5 Profil ljuljanja

Profil posrtanja definiran je uzduž linija mjerenja, a odabrane su iste linije kao i za profil ljuljanja. Rezultat je parabola te profil daje jako rješenje. Slika 5.6 prikazuje profil posrtanja s zadovoljavajućim rješenjem.



Slika 5.6 Profil posrtanja

Naposlijetku je definiran i profil skretanja na području preklapanja paralelnih linija duž pravca snimanja, paralelno uz profil posrtanja. Slika 5.7 prikazuje profil skretanja s također vrlo jakim rješenjem.



Slika 5.7 Profil skretanja

Nakon što su definirani svi potrebni profili, pokrenuta je kalibracija te su dobivene vrijednosti kutnih korekcija nadodane na linije mjerenja. Tablica 5.1 prikazuje vrijednosti kutnih korekcija dobivenih nakon kalibracije. Time je završen rad u softveru Teledyne PDS te se obrada podataka nastavlja u programu CARIS HIPS & SIPS.

Tablica 5.1 Vrijednosti kalibracijskih korekcija

KOREKCIJA	VRIJEDNOST KOREKCIJE [°]
Ljuljanje (roll)	-16,90
Posrtanje (pitch)	0,39
Skretanje (yaw)	3,12

5.2. CARIS HIPS & SIPS

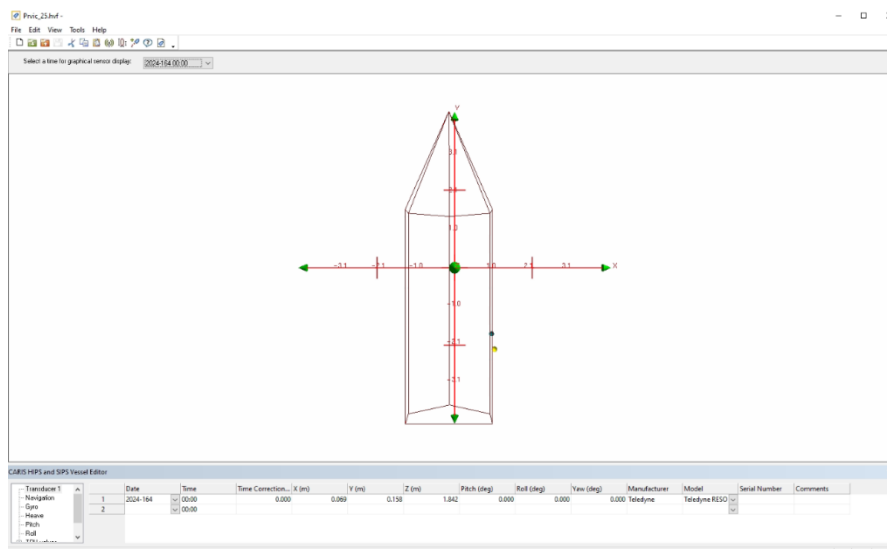
Nakon obrade podataka u Teledyne PDS-u, proces se nastavlja u specijaliziranom softveru CARIS HIPS & SIPS. Prvi korak u ovom softveru je učitavanje podataka i unos svih relevantnih parametara broda, uključujući i kalibracijske podatke. Nakon toga, pristupa se georeferenciranju batimetrijskih podataka. Sljedeća faza uključuje izradu batimetrijske plohe koja vizualizira morfologiju morskog dna.

Nakon stvaranja plohe, kreira se Beam Pattern (uzorak snopa), a istovremeno se izrađuje backscatter mozaik, koji pruža detaljne informacije o povratnom signalu sonara i pomaže u identifikaciji različitih tipova morskog dna. Na kraju ovog procesa, koriste se napredni upiti kako bi se precizno izdvojila područja posidonije, područja prekrivena kamenjem te područja sa sedimentom.

5.2.1. Vessel Editor

Vessel Editor je alat koji se koristi za stvaranje i uređivanje datoteka po imenu HIPS Vessel Files (HVF). Ove datoteke sadrže sve potrebne informacije koje omogućuju kombiniranje podataka sa svih senzora na plovilu. Te informacije koriste se za stvaranje konačnog zapisa o poziciji i dubini plovila. Kako su svi unosi iz senzora vremenski označeni, može se koristiti jedna HVF datoteka tijekom cijelog vijeka trajanja plovila (Teledyne CARIS, 2020).

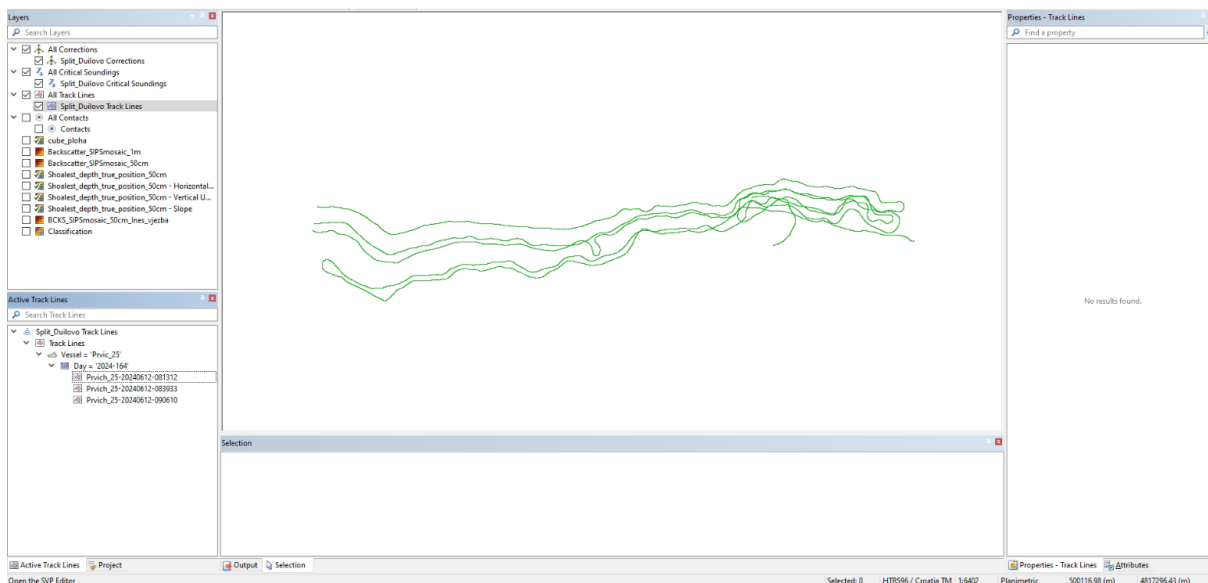
Parametri plovila, kao i kalibracijski podaci, dodani su u Vessel Editor. Koordinatni sustav je trodimenzionalan, a temelji se na lokacijama senzora montiranih na brod. Položaj dubinomjera u odnosu na referentnu točku izračunat je i unesen u program. On se izražava po koordinatnim osima i po X-osi iznosi 0,069 m, po Y-osi iznosi 0,158 m, a po Z-osi iznosi 1,842 m. Slika 5.8 prikazuje Vessel Editor s pripadnim parametrima.



Slika 5.8 Vessel Editor

5.2.2. Georeference bathimetry

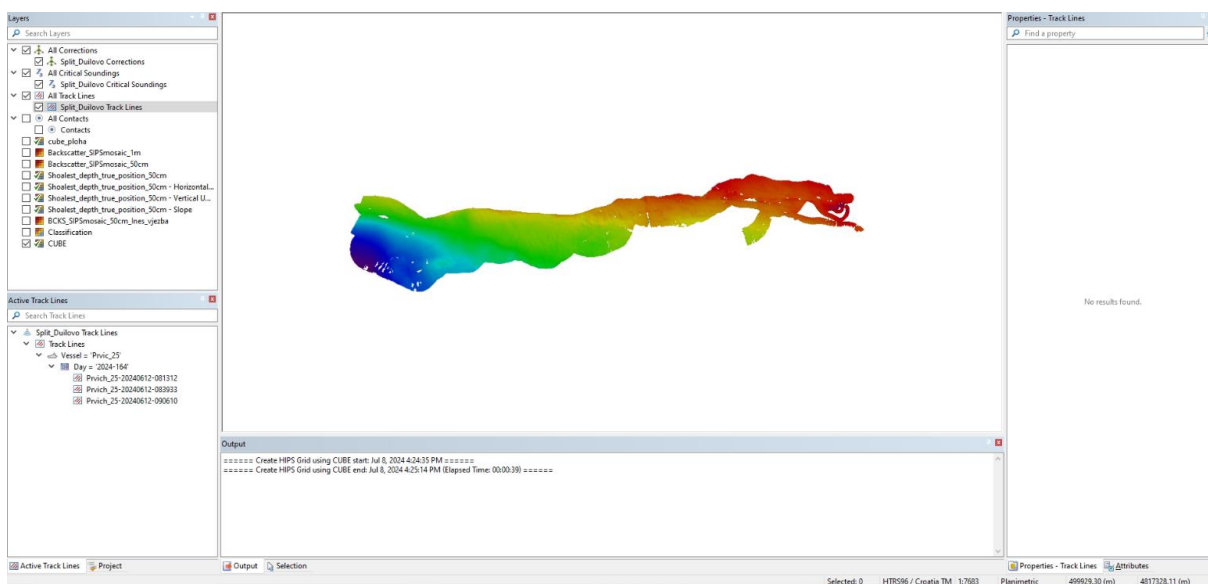
Kad se podaci unesu u CARIS HIPS & SIPS, ne mogu se odmah koristiti za stvaranje površina ili mozaika. U ovoj fazi, dubine su zabilježene samo kao osnovne informacije koje uključuju vrijeme, sirovu udaljenost i kutove prema plovilu. Te osnovne informacije dovoljne su za izračunavanje položaja dubine u odnosu na brod. Proces georeferenciranja batimetrije kombinira ove osnovne podatke s informacijama drugih senzora, poput navigacije, gibanja broda i plime. Rezultat toga je obrađena dubina koja ima XYZ koordinate u poznatom koordinatnom sustavu (Teledyne CARIS, 2020). Slika 5.9 prikazuje georeferencirane podatke batimetrije.



Slika 5.9 Georeferencirani podaci batimetrije

5.2.3. Izrada plohe

Nakon georeferenciranja batimetrije, slijedi izrada CUBE plohe. CARIS ploha je mrežasti prikaz georeferenciranih podataka o dubini stvoren pomoću različitih algoritama. Odabrana metoda mreženja je CUBE metoda s rezolucijom plohe od 0,50 m. Referentni koordinatni sustav je HTRS96/TM. Ovako dobivena ploha vizualno prikazuje podatke o dubinama. Slika 5.10 prikazuje nastalu plohu.



Slika 5.10 CUBE ploha

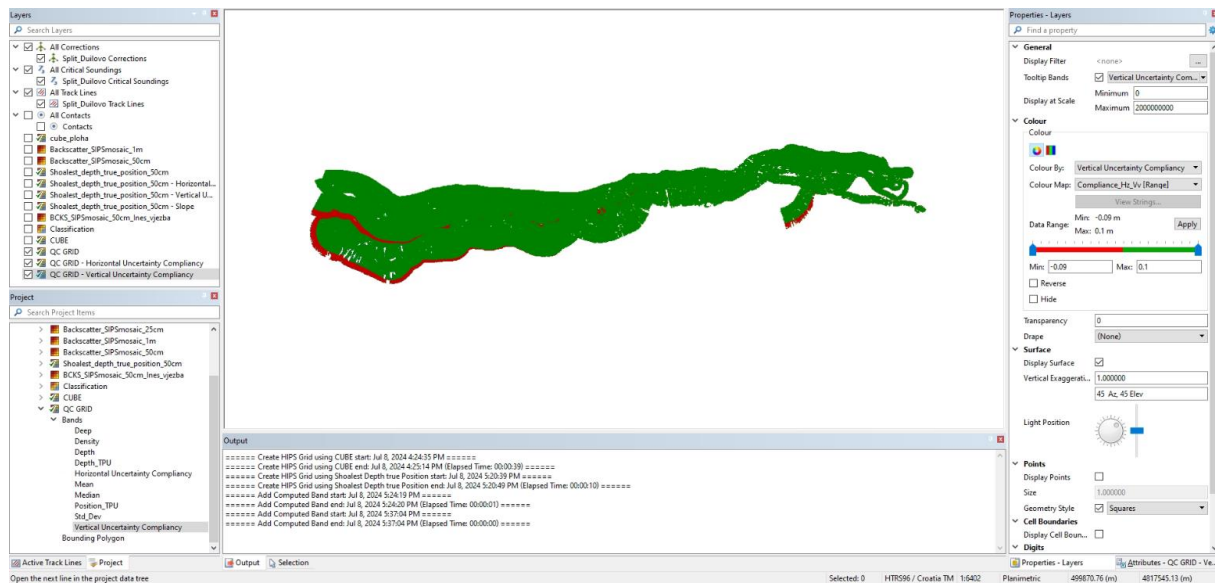
Tijekom provođenja hidrografskih istraživanja prema IHO – S44 specifikacijama, koristi se formula (23) za precizan izračun nesigurnosti mjerenja dubine uz razinu pouzdanosti od 95% (Teledyne CARIS, 2020).

$$\pm\sqrt{a^2 + (b \ x \ d)^2} \quad (23)$$

gdje

- a predstavlja dio nesigurnosti koji ne varira s dubinom,
- b je koeficijent koji predstavlja dio nesigurnosti koji varira s dubinom,
- d predstavlja dubinu,
- b x d predstavlja dio nesigurnosti koji varira s dubinom.

Slika 5.11 prikazuje provedenu kontrolu kvalitete nad mjerenim podacima te je vidljivo kako ne odgovaraju svi podaci postavljenom standardu.

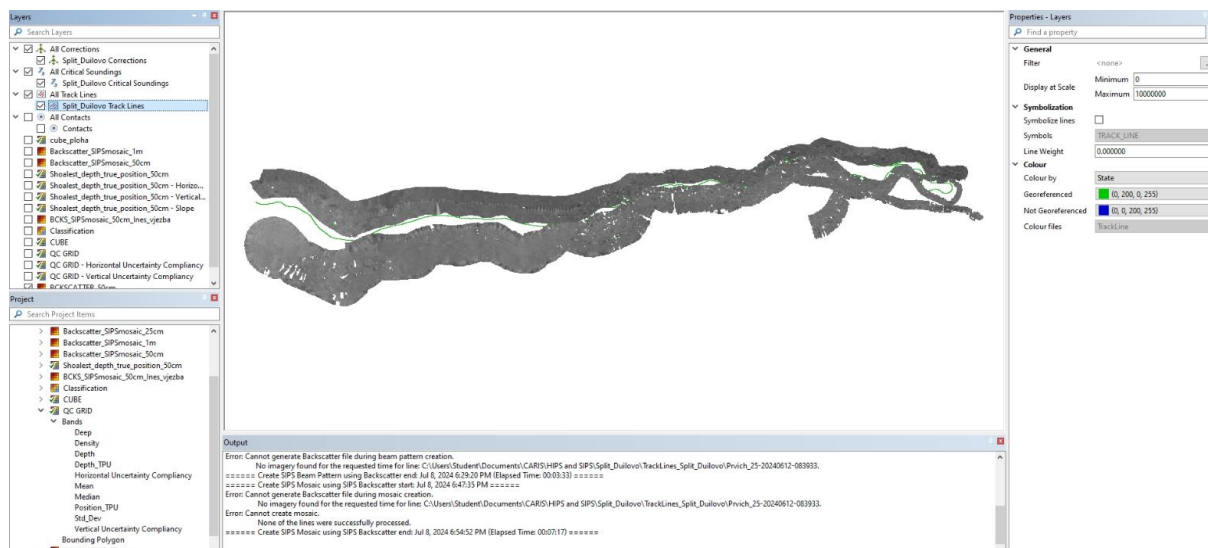


Slika 5.11 Kontrola kvalitete podataka prema IHO – S44 specifikacijama

5.2.4. Izrada plohe iz podataka povratnog raspršenja

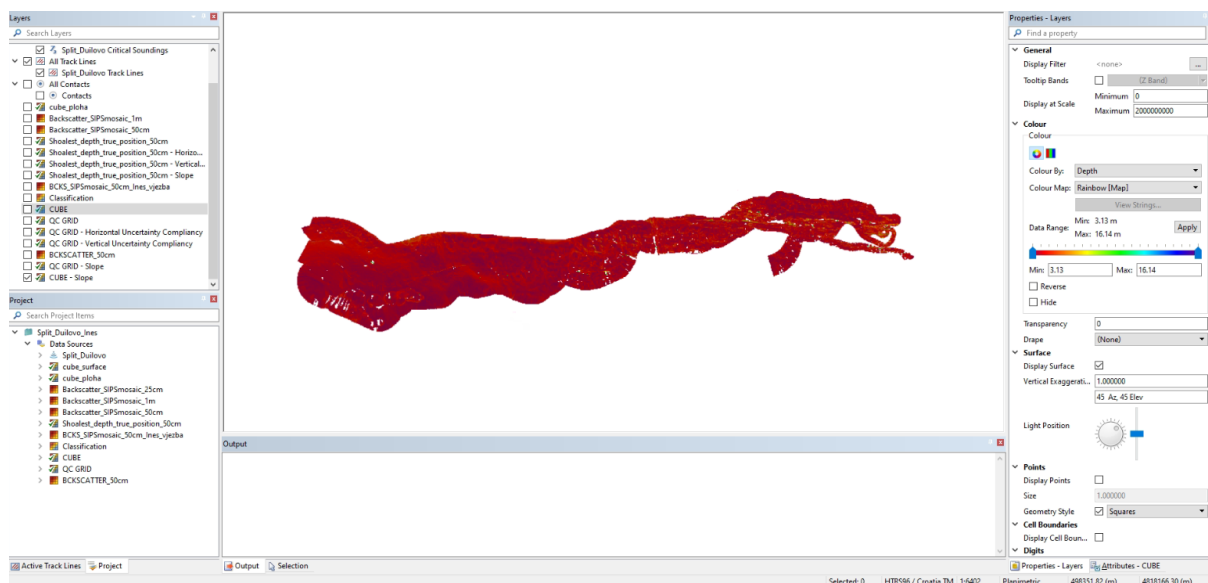
Prije izrade plohe iz podataka povratnog raspršenja kreiran je Beam Pattern (uzorak snopa). Pomoću uzorka snopa pokušava se kompenzirati i optimizirati prostornu distribuciju zvučnih snopova sonara kako bi se bolje razumjeli podvodni objekti ili strukture. Pri tome se koristila lokalna temperatura apsorpcije od 23,10 °C i lokalni apsorpcijski salinitet od 38‰.

Zatim slijedi obrada povratnog signala. Funkcijom New SIPS Mosaic kreira se ploha koja sadrži intenzitet povratnog raspršenja izraženog u decibelima (Slika 5.12). Rezolucija plohe je 0,5 m, a referentni koordinatni sustav je također HTRS96/TM. Sa slike je vidljivo da se nije kreirala ploha na svim dijelovima područja mjerenja te je dio podatka nakon pregleda izostavljen iz daljnje obrade zbog povećanog šuma tijekom mjerenja.



Slika 5.12 Ploha nastala iz povratnog raspršenja

Nadalje će se vršiti detaljna klasifikacija morskog dna u odnosu na dubinu, intenzitet povratnog signala i nagib terena, kako bi se dobila što preciznija slika karakteristika podmorja. Radi toga se prvo izradila ploha nagiba terena koju prikazuje Slika 5.13.

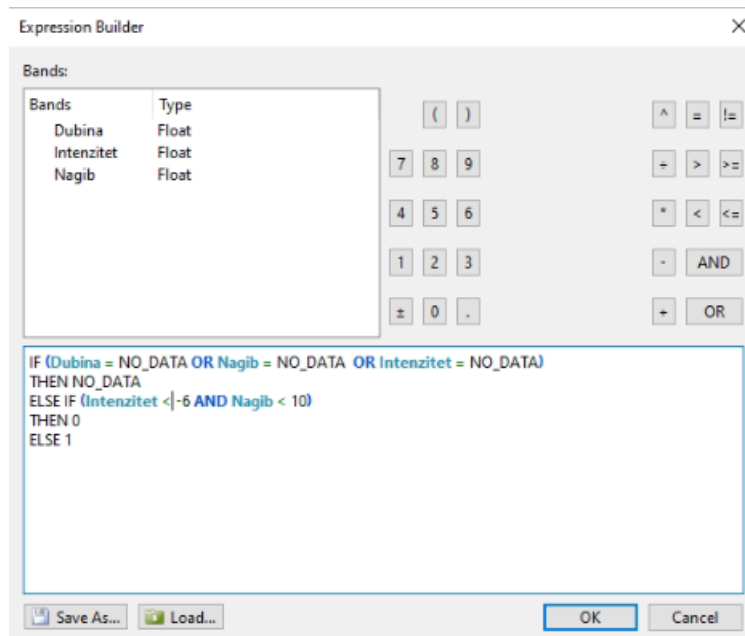


Slika 5.13 Ploha nagiba terena

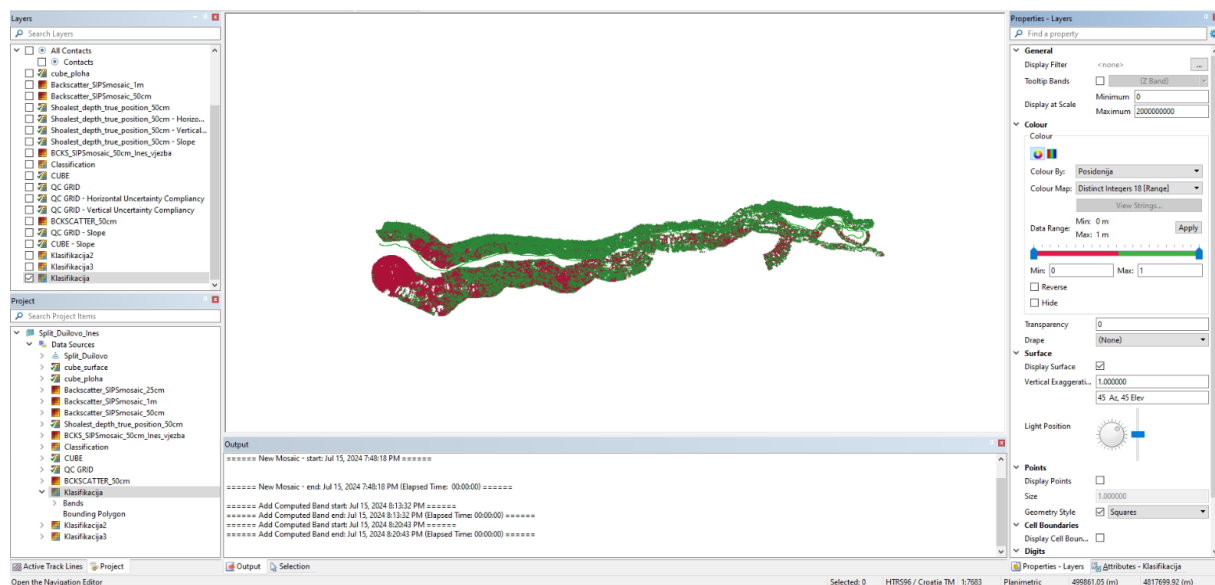
5.2.5. Klasifikacija

Klasifikacija područja od interesa temelji se na tri ključna faktora: dubini, nagibu morskog dna i intenzitetu povratnog raspršenja. Prvi korak u procesu je identifikacija područja gdje je prisutna posidonija. Područja s nižim intenzitetom i manjim nagibom morskog dna mogu ukazivati postojanje posidonije, s obzirom da gusta vegetacija često utječe na refleksiju sonarnih signala. Dubina područja se kreće između 3,13 m i 16,14 m, pa s obzirom da se posidonija može nalaziti i na većim dubinama od navedenih, ona se neće uzimati u obzir. Slika

5.14 prikazuje izraz kojim su se odvojila područja posidonije, a Slika 5.15 izdvojena područja posidonije.



Slika 5.14 Izraz za izdvajanje područja posidonije



Slika 5.15 Izdvojena područja posidonije

Idući korak je identifikacija kamena na zadanom području. Kamenje ima veći stupanj refleksije u usporedbi s mekim sedimentom ili posidonijom te se često nalazi na relativno ravnom terenu. Stoga će se za definiranje ovog upita koristiti intenzitet veći od 0 dB i nagib terena manji od 7 stupnjeva. Dubina opet neće biti kriterij jer se kamene formacije mogu pronaći na različitim dubinama. Slika 5.16 prikazuje izraz kojim su se izdvojila kamenja na morskome dnu, a Slika 5.17 izdvojeno kamenje.

```

IF (Dubina = NO_DATA OR Nagib = NO_DATA OR Intenzitet = NO_DATA)
THEN NO_DATA
ELSE IF (Intenzitet >= 0 AND Nagib < 7)
THEN 0
ELSE 1

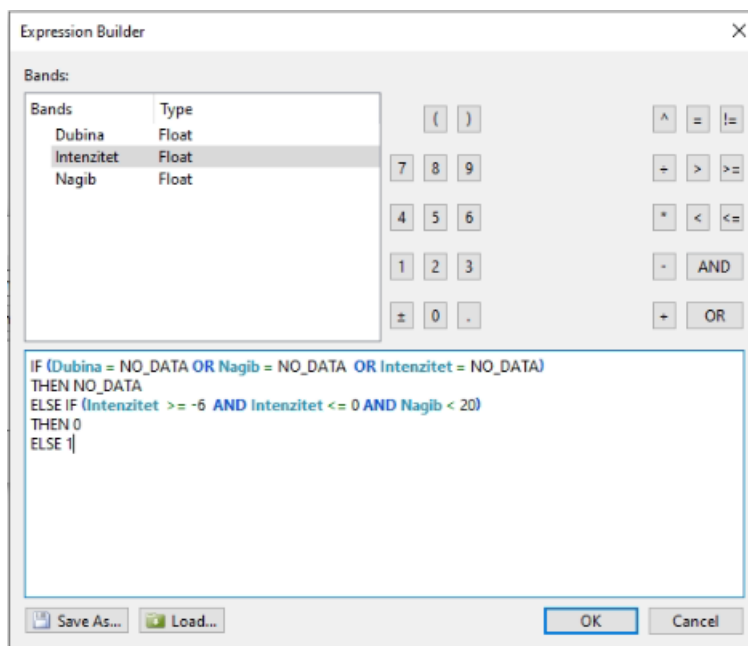
```

Slika 5.16 Izraz za izdvajanje kamenja na morskom dnu

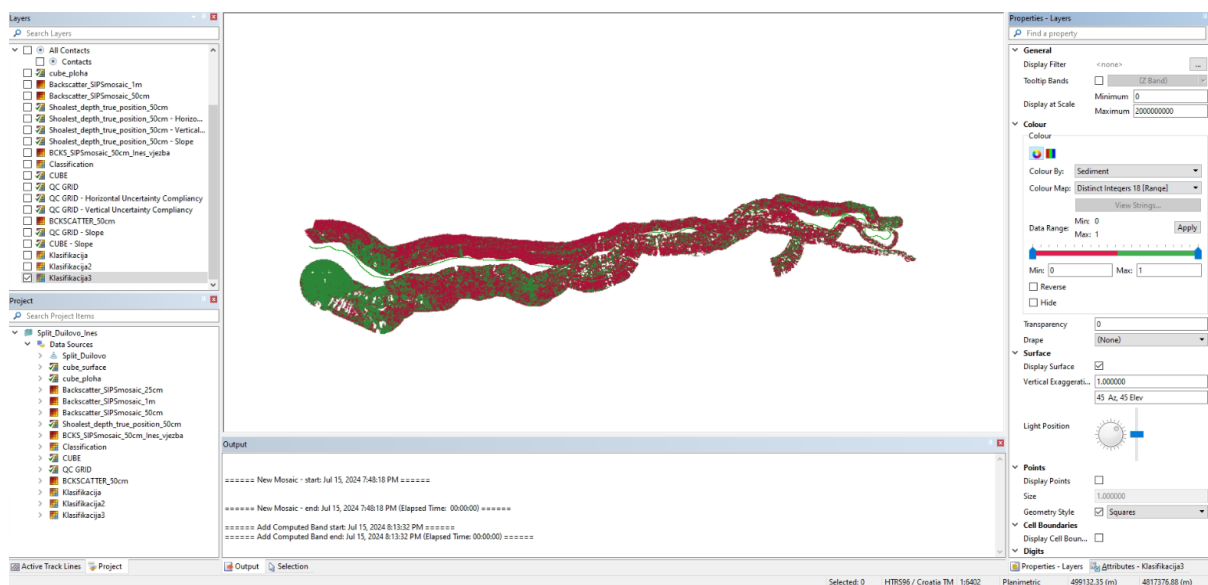


Slika 5.17 Izdvojeno kamenje na morskom dnu

Naposljetku, sediment se izdvaja kao poseban element u analizi morskog dna. Pritom je izraz definiran tako da se između područja posidonije i područja prekrivenog kamenjem ne ostavljaju praznine, već se jasno prikazuje sediment. Da bi se to postiglo, vrijednosti intenziteta i nagiba su precizno odabrane. Odabrana vrijednost intenziteta je definirana tako da bude veća od -6 dB, a manja od 0 dB. Ovaj raspon je dovoljno uski da isključi intenzivne povratne signale koji su karakteristični za kamenje, ali i dovoljno jak da isključi slabije signale koji dolaze od posidonije. Sediment se obično nalazi na ravnijim ili blago nagnutim područjima morskog dna. Stoga je vrijednost nagiba odabrana tako da bude manja od 20 stupnjeva. Dubina se ne uzima u obzir u ovoj analizi jer se sediment može naći na raznim dubinama morskog dna. Slika 5.18 prikazuje izraz kojim se izdvojio sediment na morskome dnu, a Slika 5.19 izdvojeni sediment.



Slika 5.18 Izraz za izdvajanje sedimenta na morskom dnu



Slika 5.19 Izdvojeni sediment na morskom dnu

6. REZULTATI I DISKUSIJA

Kod kreiranja mozaika iz povratnog raspršenja korištena je metoda „SIPS Backscatter (WMA with Area based AVG)”. Ova metoda izračunava prosjek podataka unutar definiranog radijusa pretraživanja, umjesto da se prosjek računa za svaku pojedinu liniju podataka. Zadani radijus pretraživanja oko svakog zvučnog odjeka za prosjek je dobiven kao rezolucija pomnožena s množiteljem radijusa pretraživanja. Svi odjeci unutar radijusa doprinose konačnom prosjeku,

što pomaže u smanjenju buke i poboljšava kvalitetu slike. Metoda omogućuje stvaranje oštrijih rubova u dobivenoj slici, ali može zahtijevati više vremena za izračunavanje. Slika 6.1 prikazuje plohu dobivenu iz podataka povratnog raspršenja na DOF podlozi. Ploha sadrži vrijednosti intenziteta koje se kreću od -33,152 dB do 17,876 dB.



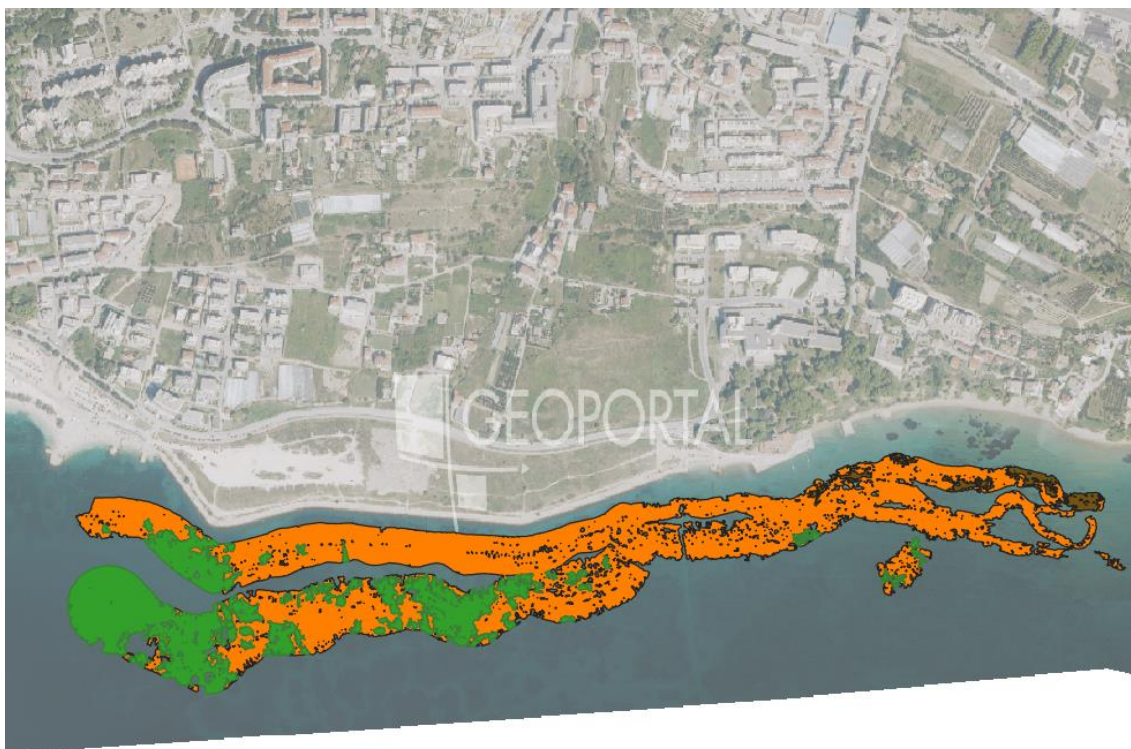
Slika 6.1 Prikaz plohe dobivene iz podataka povratnog raspršenja na DOF podlozi

Batimetrijska ploha odnosi se na geometrijski prikaz dubinskih mjerenja na morskome dnu. Sadrži izobate s ekvidistancom od 5 m i dubine pojedinih točaka dna. Slika 6.2 prikazuje batimetrijsku plohu na području izmjere te se dubine na navedenom području kreću od 3,13 m do 16,14 m.



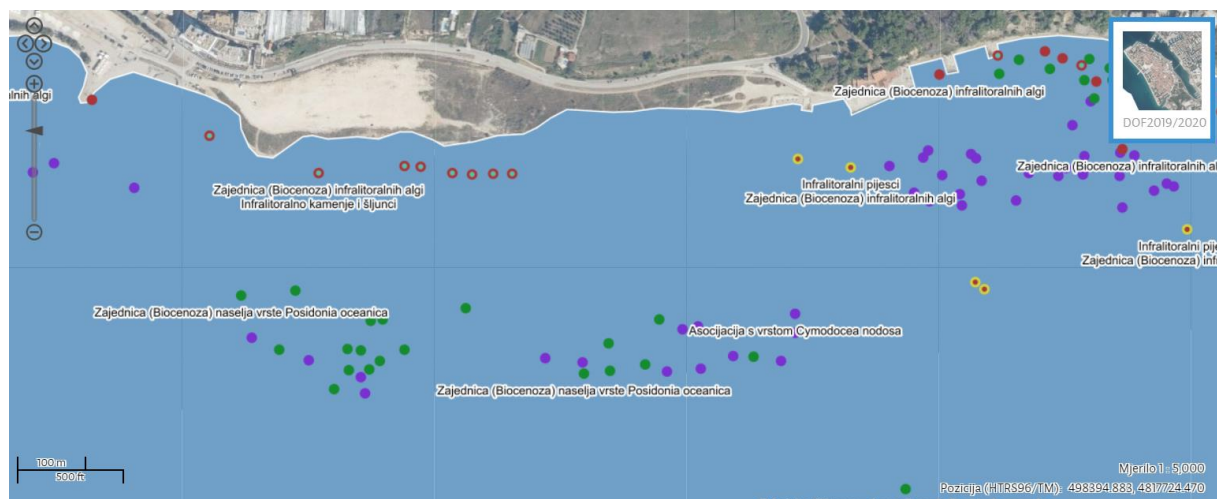
Slika 6.2 Batimetrijska ploha na DOF podlozi

Kako bismo mogli vizualizirati krajnji produkt s obzirom na obalu grada Splita, u HTRS96/TM referentnom koordinatnom sustavu, podaci su ubačeni u softver QGIS. Područja morskog dna prekrivena posidonijom, kamenjem i sedimentom su prikazana u različitim bojama na digitalnoj ortofoto karti (Slika 6.3), pa je tako posidonija prikazana zelenom, sediment narančastom, a kamenje smeđom bojom. Ova područja su važna za filtriranje vode i pružanje hranjivih tvari. Sve ove kategorije zajedno pružaju cjelovitu sliku morskog dna na obali Splita, omogućujući bolje razumijevanje i upravljanje ovim važnim ekosustavom. Iako je točna klasifikacija morskoga dna izazovna zbog mogućih pogrešaka softvera i instrumenata, za kontrolu rezultata korišten je Bioportal (Slika 6.4), platforma koja pruža pristup bioraznolikostima i ekološkim podacima.



Slika 6.3 Prikaz bentičkih staništa na DOF podlozi

Prema statističkim podacima (Tablica 6.1), morska trava *Posidonija* pokriva ukupno područje od 51584 m² što iznosi 25,34%, sediment pokriva značajno veće područje od 147697 m² što iznosi 72,55%, a površina prekrivena kamenjem iznosi 4306 m² što iznosi 2,11% ukupne površine izdvojenih bentičkih staništa. Razumijevanje raspodjele navedenih površina važno je za procjenu pogodnosti područja za različite organizme i ljudske aktivnosti.



Slika 6.4 Bioportal

Tablica 6.1 Statistički podaci karakteristika morskog dna

	Površina [m ²]	Postotak [%]
Posidonija	51583,79	25,34
Sediment	147696,67	72,55
Kamenje	4305,84	2,11

7. ZAKLJUČAK

Hidrografija, kao ključna grana primijenjenih znanosti, igra vitalnu ulogu u razumijevanju i upravljanju fizičkim obilježjima vodenih tijela. Njezina primjena obuhvaća sigurnost plovidbe, gospodarski razvoj, znanstvena istraživanja, te zaštitu okoliša. Temeljni elementi hidrografije uključuju fizikalnu oceanografiju, marinsku oceanologiju i pomorsku geodeziju, čime se osigurava precizno pozicioniranje na vodi, određivanje obalne linije, mjerenje dubina i izrada navigacijskih informacijskih sustava.

Tehnološki napredak u komunikacijskim sredstvima omogućio je prenošenje informacija na velike udaljenosti koristeći elektromagnetske valove. Međutim, zbog svojstava vode koja brzo rasipa elektromagnetske valove, akustični valovi postali su glavni alat za podvodna istraživanja. Akustični valovi, s brzinom širenja četiri do pet puta većom u vodi nego u zraku, omogućuju efikasno mjerenje batimetrije i komunikaciju pod vodom, unatoč izazovima poput apsorpcije i okolišnog šuma.

Primjena akustičnih sustava u hidrografiji omogućuje otkrivanje i lociranje prepreka, mjerenje karakteristika morskog okoliša te komunikaciju između podvodnih i površinskih plovila. Aktivni i pasivni sonarni sustavi koriste se za reflektiranje signala ili primanje zvučnih impulsa, pružajući detaljne podatke o morskome dnu i okolišu. Višesnopni dubinomjeri, posebno swath i sweep sustavi, omogućuju efikasno kartiranje morskog dna, čime se osigurava 100%-tna pokrivenost uz povećanu produktivnost.

U istraživanju obale Splita, korištenjem programa Teledyne PDS, Caris Hips & Sips, te QGIS, dobiveni su detaljni podaci o morskome dnu prekrivenom posidonijom, kamenjem i sedimentom. Ovi podaci su ključni za razumijevanje ekosustava i omogućuju bolje upravljanje resursima.

Područja s nižim intenzitetom i manjim nagibom morskog dna često ukazuju na postojanje posidonije, s obzirom da gusta vegetacija često utječe na refleksiju sonarnih signala. Kamenje, koje ima veći stupanj refleksije u usporedbi s mekim sedimentom ili posidonijom, nalazi se na relativno ravnom terenu s intenzitetom većim od 0 dB i nagibom terena manjim od 7 stupnjeva. Sediment se izdvaja kao poseban element s intenzitetom između -6 dB i 0 dB te nagibom manjim od 20 stupnjeva.

Detaljna istraživanja utjecaja ljudskih aktivnosti, uključujući ribolov, pomorski promet i urbanu razvoj, trebaju također biti provedena kako bi se procijenili njihovi utjecaji na morske ekosustave. Ove studije mogu pomoći u razvijanju održivih praksi i politika za smanjenje negativnih utjecaja na okoliš.

Hipoteza je opravdana i prihvaćena, jer rezultati potvrđuju ključnu ulogu podataka povratnog raspršenja signala u preciznom kartiranju morskog dna.

Zaključno, hidrografija, uz podršku suvremenih tehnologija i metoda, pruža neprocjenjive podatke i alate za održivo upravljanje morskim okolišem, doprinosi sigurnosti plovidbe i podržava gospodarski i znanstveni napredak. Unatoč izazovima, kontinuirani razvoj i primjena akustičnih tehnologija obećavaju daljnja unapređenja u ovoj ključnoj znanstvenoj disciplini.

LITERATURA

- Amiri-Simkooei, A. R., Snellen, M., Simons, D. G. (2011): Principal component analysis of single-beam echo-sounder signal features for seafloor classification, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 36(2), 259-272.
- Bakran-Petricioli, T. (2007): *Morska staništa: priručnik za inventarizaciju i praćenje stanja*, Državni zavod za zaštitu prirode, Zagreb.
- Bjørnø, L., Neighbors, T., Bradley, D. (2017): *Applied underwater acoustics*, 297-302. Amsterdam: Elsevier.
- Brown, C. J., Smith, S. J., Lawton, P., Anderson, J. T. (2011): Benthic habitat mapping: A review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 92(3), 502-520.
- Fisher, F. H., Simmons, V. P. (1977): Sound absorption in sea water, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 62(3), 558-564.
- Hovem, J. M. (2007): Underwater acoustics: Propagation, devices and systems, *Journal of Electroceramics*, Vol. 19, 339-347.
- Hughes Clarke, J. E. (2018): Multibeam echosounders, *Submarine geomorphology*, 25-41.
- International Hydrographic Organization (2019): *S-32 Hydrographic Dictionary*
- Kuperman, W. A., Roux, P. (2014): Underwater acoustics, *Springer Handbook of Acoustics*, 157-212.
- Littlehales, G.W. (1894): How the Sea Is Sounded, *Popular Science Monthly*, *Popular Science Monthly*, Vol. 44.
- Lurton, X. (2002): *An introduction to underwater acoustics: principles and applications*, Springer Science & Business Media.
- Montefalcone, M. (2009): Ecosystem health assessment using the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: a review, *Ecological indicators*, Vol. 9(4), 595-604.
- Pionić, O. (2004): ŠIRENJE ZVUKA U MORSKOJ VODI, NAŠE MORE, Vol. 51, No. 5-6, 200-205.
- Pribičević, B. (2005): *Pomorska geodezija*, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet.
- Teledyne CARIS, (2020): *Backscatter Imagery Data Processing CARIS HIPS and SIPS Professional 11.4, Training Manual*. Teledyne CARIS.
- Teledyne Marine (n.d.): *SeaBat T20-P, product datasheet*.
- Trimble Applanix (n.d.): *Applanix POS MV WaveMaster II, datasheet*.
- Valeport (n.d.): *miniSVP Sound Velocity Profiler, datasheet*.
- Wahlberg, M., Larsen, O. N. (2017): Propagation of sound, *Comparative bioacoustics: An overview*, 61-120.

POPIS URL-ova

URL 1. https://hr.wikipedia.org/wiki/Jadransko_more#/media/Datoteka:Adriatic_Sea.jpg
(27.06.2024.)

URL 2. <https://www.teledynemarine.com/en-us/products/Pages/SeaBat-T20-P.aspx>
(27.06.2024.)

URL 3. <https://www.applanix.com/products/posmv.htm> (27.06.2024.)

PRILOZI

Prilog 1. Prikaz bentičkih staništa snimljenog područja kod grada Splita

Prilog 2. Prikaz povratnog raspršenja snimljenog područja kod grada Splita


Prilog 3. Batimetrijska karta snimljenog područja kod grada Splita

ŽIVOTOPIS

OSOBNJE INFORMACIJE

Ines Ivanković

 Braće Ilić, 43, Fažana, 52212, Hrvatska.

 0958199557

 Ines.ivankovic15@gmail.com

Spol Žensko | **Datum rođenja** 10/09/2000 | **Državljanstvo** hrvatsko

RADNO ISKUSTVO

ožujak 2024. – lipanj 2024.

Zavod za fotogrametriju d.d.

Borongajska cesta 71, Zagreb

- rad na terenu s geodetskim instrumentima kao što su totalna stanica i GNSS uređaj
- rad u ZWCAD-u
- izrada digitalnih geodetskih elaborata
- projekt revizije toponima

listopad 2023. – siječanj 2024.

Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Kačićeva 26, Zagreb

- rad na Katedri za satelitsku geodeziju
- pomoć studentima pri izvođenju i obradi statičkih GNSS mjerenja
- pomoć studentima pri izvođenju i obradi kinematičkih GNSS mjerenja

listopad 2022. – siječanj 2023.

Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Kačićeva 26, Zagreb

- rad na Katedri za satelitsku geodeziju
- pomoć studentima pri izvođenju i obradi statičkih GNSS mjerenja
- pomoć studentima pri izvođenju i obradi kinematičkih GNSS mjerenja

srpanj 2023. – rujan 2023.

Ured ovlaštenog inženjera geodezije Tanja Topolovec

Puljska cesta 27c, Fažana

- rad na terenu s geodetskim instrumentima kao što su totalna stanica i GNSS uređaj
- rad u ZWCAD-u
- izrada digitalnih geodetskih elaborata

srpanj 2021. – rujan 2021.

Ured ovlaštenog inženjera geodezije Tanja Topolovec

Puljska cesta 27c, Fažana

- rad na terenu s geodetskim instrumentima kao što su totalna stanica i GNSS uređaj
- rad u ZWCAD-u
- izrada digitalnih geodetskih elaborata

OBRAZOVANJE I OSPOBLJAVANJE

2022. - danas

Magistrica inženjerka geodezije i geoinformatike

Curriculum vitae

Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

- Smjer: Geodezija
- Stupanj nacionalne kvalifikacije: VSS

22.7.2019. – 20.7.2022.

Sveučilišna prvostupnica inženjerka geodezije i geoinformatike

Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

- Stupanj nacionalne kvalifikacije: VŠS

2015. – 2019.

SSS - gimnazija

Gimnazija Pula

OSOBNJE VJEŠTINE

Materinski jezik Hrvatski jezik

Ostali jezici

	RAZUMJEVANJE		GOVOR		PISANJE
	Slušanje	Čitanje	Govorna interakcija	Govorna produkcija	
Engleski jezik	B2	B2	B2	B2	B2
Njemački jezik	B1	B1	B1	B1	A2

Zamijenite nazivom jezične potvrde. Upišite stupanj ako je primjenjivo.

Stupnjevi: A1/2: Temeljni korisnik - B1/B2: Samostalni korisnik - C1/C2 Iskusni korisnik

Digitalne vještine

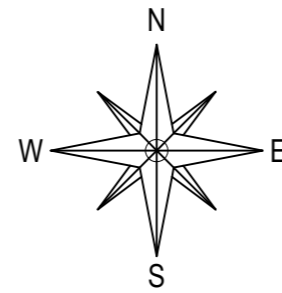
SAMOPROCJENA				
Obrada informacija	Komunikacija	Stvaranje sadržaja	Sigurnost	Rješavanje problema
Samostalni korisnik	Samostalni korisnik	Samostalni korisnik	Samostalni korisnik	Samostalni korisnik

Stupnjevi: Temeljni korisnik - Samostalni korisnik - Iskusni korisnik

[Digitalne vještine - tablica za samoprocjenu](#)

- Rad u softverima: AutoCad, QGIS, CARIS HIPS and SIPS, MS Office (Word, Excel, PowerPoint)

Vozačka dozvola B

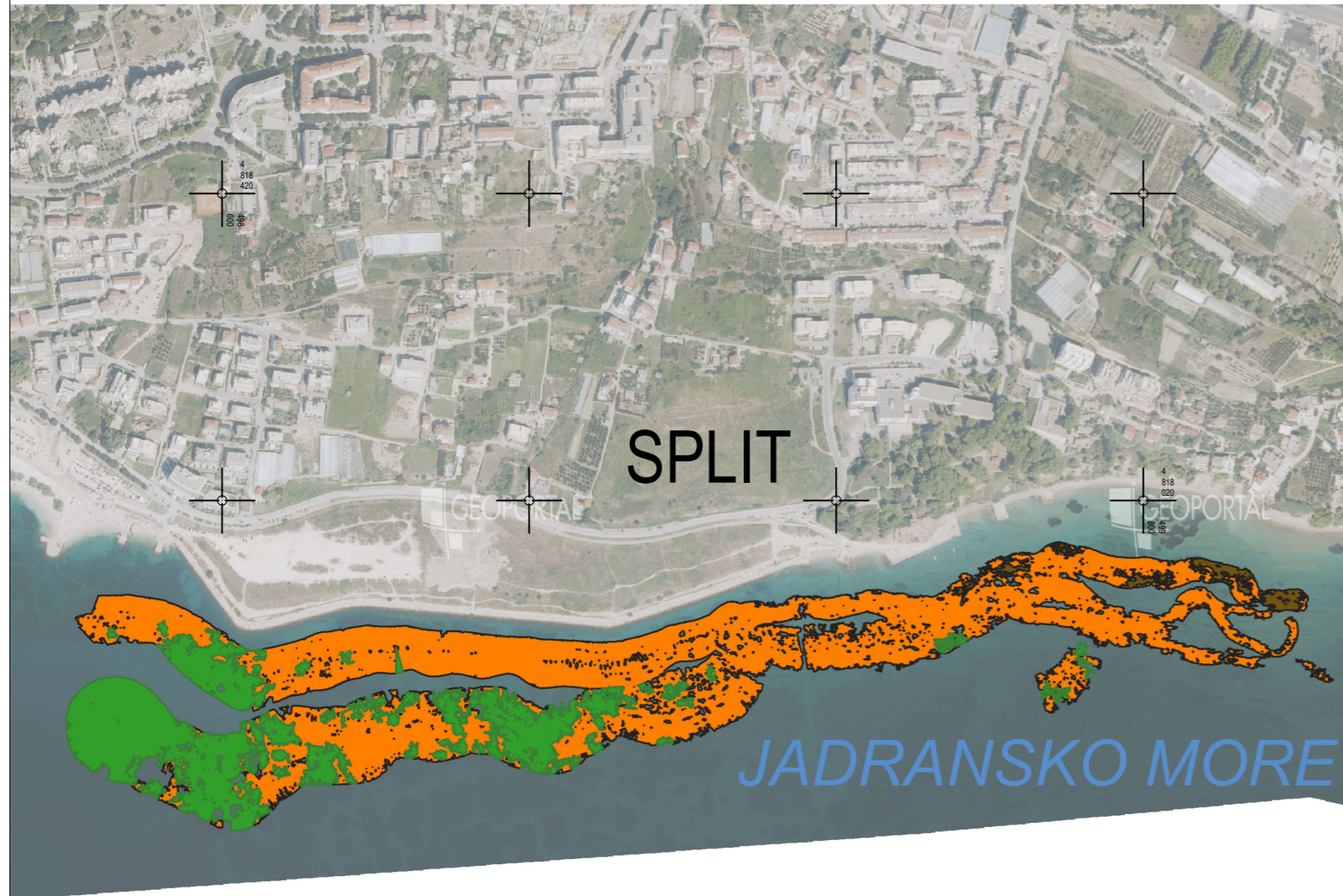


PRIKAZ BENTIČKIH STANIŠTA SNIMLJENOG PODRUČJA KOD GRADA SPLITA

OBJEKT PRIKAZA:
MORSKO DNO UZ OBALU SPLITA

DETALJAN PRIKAZ PODRUČJA:
GRAD SPLIT

PRILOG 1:
BENTIČKA STANIŠTA



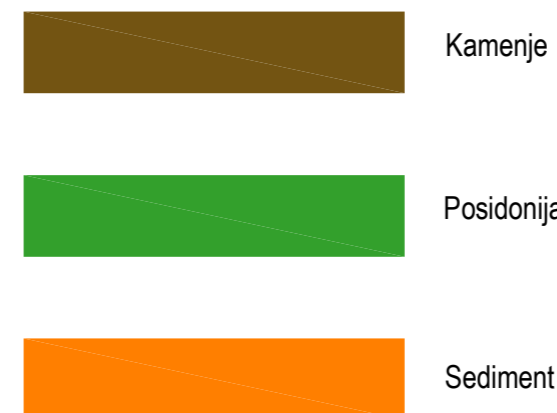
KOORDINATNI SUSTAV

Projekcija: Transverse Mercator (TM)
Elipsoid: GRS 1980
Centralni meridijan: 16 30 E
Mjerilo na c.m.: 0.9999
Pomak po osi y: 500 000
Položajni datum: HTRS96
Visinski datum: HVRS 1971

INSTRUMENTARIJ

Višesnopni dubinomjer: Teledyne Reson T20-P
Inercijalni navigacijski sustav: Applanix POS MV Wavemaster
Uređaj za mjerenje brzine zvuka u moru: Valeport miniSVP

Legenda



MJERILO 1:8500

IZMJERA I IZRADA

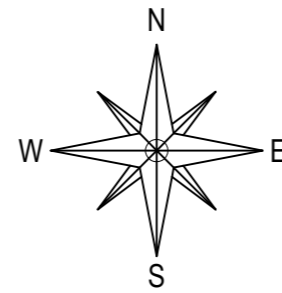
Geodetski fakultet - Sveučilište u Zagrebu,
Kačićeva 26, Zagreb



Ines Ivanković,
univ. bacc. ing. geod. et geoinf.

MJESTO I DATUM

U Zagrebu, kolovoz 2024.

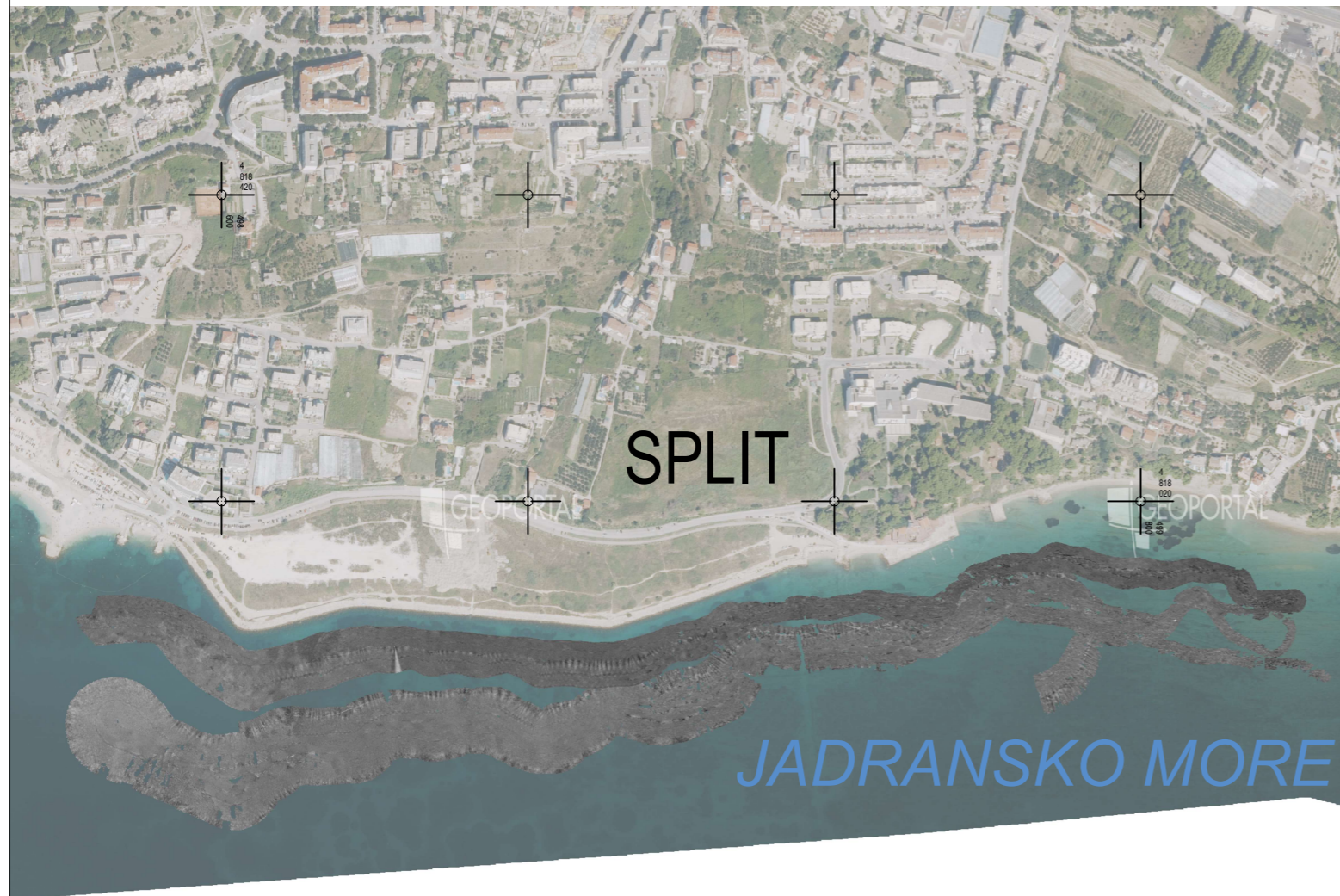


PRIKAZ POVRATNOG RASPRŠENJA SNIMLJENOG PODRUČJA
KOD GRADA SPLITA

OBJEKT PRIKAZA:
MORSKO DNO UZ OBALU SPLITA

DETALJAN PRIKAZ PODRUČJA:
GRAD SPLIT

PRILOG 2:
POVRATNO RASPRŠENJE



KOORDINATNI SUSTAV

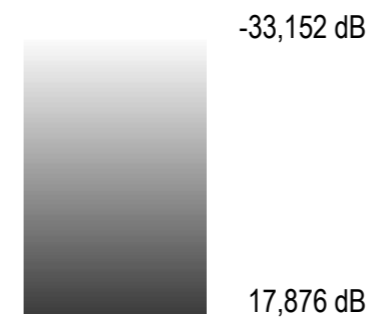
Projekcija: Transverse Mercator (TM)
Elipsoid: GRS 1980
Centralni meridijan: 16 30 E
Mjerilo na c.m.: 0.9999
Pomak po osi y: 500 000
Položajni datum: HTRS96
Visinski datum: HVRS 1971

INSTRUMENTARIJ

Višesnopni dubinomjer: Teledyne Reson T20-P
Inercijalni navigacijski sustav: Applanix POS MV Wavemaster
Uređaj za mjerenje brzine zvuka u moru: Valeport miniSVP

Legenda

Jačina signala povratnog raspršenja



MJERILO 1:8500

IZMJERA I IZRADA

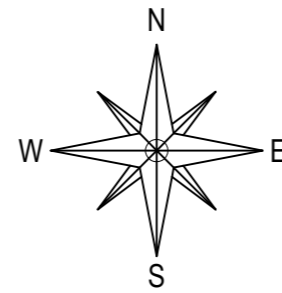
Geodetski fakultet - Sveučilište u Zagrebu,
Kačićeva 26, Zagreb



Ines Ivanković,
univ. bacc. ing. geod. et geoinf.

MJESTO I DATUM

U Zagrebu, kolovoz 2024.



BATIMETRIJSKA KARTA SNIMLJENOG PODRUČJA

KOD GRADA SPLITA

OBJEKT PRIKAZA:

MORSKO DNO UZ OBALU SPLITA

DETALJAN PRIKAZ PODRUČJA:

GRAD SPLIT

PRILOG 3:

BATIMETRIJSKA KARTA



KOORDINATNI SUSTAV

Projekcija: Transverse Mercator (TM)

Elipsoid: GRS 1980

Centralni meridijan: 16 30 E

Mjerilo na c.m.: 0.9999

Pomak po osi y: 500 000

Položajni datum: HTRS96

Visinski datum: HVRS 1971

INSTRUMENTARIJ

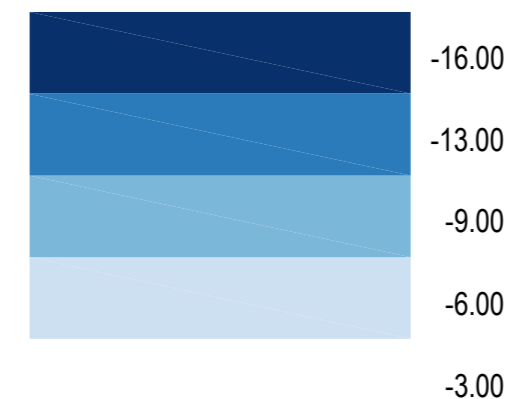
Višesnopni dubinomjer: Teledyne Reson T20-P

Inercijalni navigacijski sustav: Applanix POS MV Wavemaster

Uređaj za mjerenje brzine zvuka u moru: Valeport miniSVP

Legenda

Skala prikaza dubina



-5.70
-6.28 - dubine
-8.35

-15
-10
- izobate (ekvidistanca 5 m)

MJERILO 1:8500

IZMJERA I IZRADA

Geodetski fakultet - Sveučilište u Zagrebu,
Kačićeva 26, Zagreb



Ines Ivanković,
univ. bacc. ing. geod. et geoinf.

MJESTO I DATUM

U Zagrebu, kolovoz 2024.