

UDK 528.47:574.5:681.128.7
Pregledni znanstveni članak / Review

Integrirani hidrografski sustav za održivi razvoj morskog ekosustava

Lovro KLARIĆ, Boško PRIBIČEVIĆ, Almin ĐAPO,
Lucija ŽEGER – Zagreb¹

SAŽETAK. Prikazani su nova metodologija i rezultati hidrografskih istraživanja na projektu HIDROLAB – Integrirani hidrografski sustav za održivi razvoj morskog ekosustava. U ovom se članku pregledno prikazuje eksperimentalni razvoj sustava za prikupljanje prostornih podataka primjenom suvremenih metoda daljinskih istraživanja te analize raspršenja povratnog akustičkog signala u cijelom vodenom stupcu sa svrhom detaljnog i učinkovitog kartiranja podvodnih i priobalnih staništa. Postojeće metode nisu se pokazale dovoljno učinkovitima za dopunu karte podvodnih i priobalnih staništa hrvatskog dijela Jadranskog mora, što je propisano Direktivom 2014/89/EU. Pokrivenost teritorijalnog mora Republike Hrvatske evidentiranim prostiranjem položaja staništa iznosi oko 2%, a tu je evidenciju Republika Hrvatska sukladno Direktivi 92/43/EEZ dužna dovršiti kao osnovu za procjenu ribljeg fonda i određivanje kvota na razini Europske unije. Dosad prikupljeni podaci o staništima morskog dijela različite su preciznosti, različitih formata te su prikupljeni različitim metodama (npr. direktnim mjerenjima i indirektnim modeliranjem) zbog čega su nepouzdana i informativnog karaktera. S druge strane primijenjena je nova metodologija kojom se – uz upotrebu višesnopnog ultrazvučnog dubinomjera – morsko dno i morska staništa kartiraju nekoliko desetaka puta brže, točnije i jeftinije.

Ključne riječi: hidrografska istraživanja, višesnopni ultrazvučni dubinomjer, povratno raspršenje, pridnena staništa.

¹ Lovro Klarić, mag. ing. geod. et geoinf., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: lovro.klarić@geof.unizg.hr
Prof. dr. sc. Boško Pribičević, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: bosko.pribicevic@geof.unizg.hr
Prof. dr. sc. Almin Đapo, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: almin.dapo@geof.unizg.hr
Lucija Žeger, mag. ing. geod. et geoinf., e-mail: lzeger@geof.hr

1. Uvod

S otkrićem sonara kao akustične metode mjerenja i njegovom proširenom upotrebom u Drugom svjetskom ratu, kartiranje oceanskog dna postalo je lakše izvedivo. Akustične su tehnike također postale sofisticiranije posljednjih nekoliko desetljeća. U današnje je vrijeme kartiranje morskog dna oblik daljinskog pronicanja, uz korištenje koncepata i aplikacija svojstvenih satelitskim sustavima, prilagođenim složenom okolišu oceana uporabom akustičkih metoda. Zabilježena je vrlo široka lepeza primjena akustičkih metoda u istraživanju morskog dna, od geološkog kartiranja (npr. Ferrini i Flood 2006, Hughes Clarke i dr. 1996, Misiuk i dr. 2018, Plets i dr. 2012, Diesing i dr. 2014, Todd i dr. 1999), morske arheologije (npr. Passaro i dr. 2013, Plets i dr. 2011), praćenja promjena okoliša na morskom dnu (npr. Montereale-Gavazzi i dr. 2018, Montereale-Gavazzi i dr. 2019, Snellen i dr. 2019, van Rein i dr. 2011), kao i studije bentoskih staništa (npr. Boswarva i dr. 2018, Brown i dr. 2012, Kostylev i dr. 2003, Lacharité i dr. 2018) u koje spada i predmetno istraživanje. Višesnopni dubinomjeri postali su glavni izbor mjernog alata za takvu vrstu istraživanja (Brown i dr. 2011, Brown i Blondel 2009, Lucieer i dr. 2018).

Za potrebe predmetnih istraživanja nabavljen je višesnopni dubinomjer (engl. *multibeam echo-sounder*) Teledyne Reson SeaBat T50-R s integriranom inercijalnom mjernom jedinicom i dvije GNSS antene. Za upravljanje višesnopnim dubinomjerom tijekom izmjere, nabavljen je softver Teledyne Marine Sonar User Interface, a za naknadnu kalibraciju, softverski paket Teledyne PDS. Pomoću softverskog paketa Teledyne PDS, izračunati su korekcijski parametri koji su potom primijenjeni na podatke mjerenja. U softverskom paketu CARIS HIPS & SIPS, koji je također nabavljen u sklopu predmetnog projekta, izvedena je analiza snage povratnog raspršenja. Temeljem analiziranih podataka povratnog raspršenja (engl. *backscatter*) provodi se kartiranje morskih staništa. Konačni podaci vizualizirani su u softverskim paketima CARIS HIPS & SIPS te QGIS.

Višesnopni dubinomjeri najčešće se upotrebljavaju za mjerenje dubine morskog dna, odnosno batimetriju. Međutim, prije spomenuti softveri za obradu prikupljenih podataka povratnog raspršenja omogućuju njihovu primjenu u složenom postupku kartiranja morskih staništa. Temeljem toga koncepta istraživanja raspršenja povratnoga signala, razvijena je metodologija detekcije morskog staništa posidonije i klasifikacija sedimenata morskog dna na odabranim testnim područjima.

Svrha je kartiranja podmorskih staništa izrada cjelovitog i detaljnog prikaza podmorja kroz interdisciplinarni pristup gdje znanstvenici raznih grana znanosti surađuju tako da geodeti hidrografi izrađuju batimetrijsku kartu i provode složenu analizu akustičkih značajki dna, geolozi prikazuju litologiju i sedimentologiju, dok biolozi opažaju i klasificiraju podvodni živi svijet (Pribičević i dr. 2016). Na taj se način prikupljeni podaci ujedinjuju u primjereno strukturiranu bazu podataka koja čini osnovu za daljnju interdisciplinarnu analizu. Analiza nam daje uvid u prisutnost staništa posidonije što utječe na bioraznolikost morskog života, a kartiranje iste omogućava preventivno djelovanje u svrhu zaštite tog područja. Prema Direktivi o staništima na području Europske un-

ije, naselja posidonije smatraju se prioritarnim staništem, što zahtijeva mjere očuvanja. Izmjera i kartiranje morskog dna u sklopu navedenog projekta rezultirat će povećanjem dostupnosti podataka o morskim staništima, a samim time i mogućnosti njihove zaštite. Upravo u tom indirektnom i neinvazivnom postupku, koji je uz to iznimno brz u odnosu na dosadašnje metode korištenja ronioca, vidljiv je veliki doprinos geodetskih znanstvenika unutar prije navedenog interdisciplinarnog tima znanstvenika koji provode istraživanja morskih staništa.

Uključivanjem podataka predmetnog projekta odnosno istraživanja u EMODnet mrežu (engl. European Marine Observation and Data Network), a i projektima koji slijede, postići će se internacionalizacija predmetnih znanstvenih istraživanja. Mreža EMODnet razvijena je od Europske komisije i omogućava pristup podacima o europskim morima kroz batimetriju, geologiju, morska staništa, biologiju, fiziku i ljudske aktivnosti (Vrdoljak i dr. 2021).

U sklopu predmetnih istraživanja izvedena su mjerenja i složeni postupak njihove obrade na odabranim testnim područjima, kako bi se definirala metodologija za izvođenje velikog projekta „Kartiranje obalnih i pridnenih morskih staništa na području Jadranskog mora pod nacionalnom jurisdikcijom“. U realizaciji tog projekta planirana je izmjera minimalno 51% površine obalnih i pridnenih morskih staništa na hrvatskom teritorijalnom moru i epikontinentalnom pojasu.

2. Metodologija istraživanja

Podvodna akustika temelji se na proučavanju propagacije zvuka u moru te morskim sedimentima. Odašlani akustični val koji prolazi kroz vodu nailazi na čestice, mjehuriće, živa bića, slojeve duž vodenog stupca koje karakterizira različita brzina zvuka te u konačnici nailazi na dno. Pri dolasku akustičnog signala do morskog dna, dio se reflektira u simetričnom smjeru, dio se rasprši u svim smjerovima, dok ostatak signala penetrira u morsko dno, gdje putuje u drugom smjeru ovisno o refrakciji (Lurton 2010).

Morsko dno je savršeni reflektor za vrijeme mirnih, idealnih uvjeta. S obzirom na različite sedimente morskog dna, savršena refleksija akustičnog signala ne postoji. Vrsta sedimenta je važan faktor za količinu energije koja se izgubi u morskom dnu (Jackson i Richardson 2007). Iz refleksije je moguće donijeti zaključke o karakterističnim obilježjima morskog dna i akustičkoj impedanciji. O akustičkoj impedanciji ovisi reflektivnost svakog od sedimenata.

S druge strane, pri svakoj promjeni brzine zvuka u vodi javlja se refrakcija. S obzirom na to da se brzina zvuka mijenja s promjenom temperature, saliniteta i tlaka, refrakcija zvuka česta je na većim dubinama. Refrakcija zvuka u vodi opisuje se Snellovim zakonom, matematička osnova kojega je prikazana izrazom (1):

$$\frac{\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1)} = \frac{c_2}{c_1} \quad (1)$$

gdje je $c_{1,2}$ oznaka za brzinu zvuka u vodi, θ_2 je refraktirani kut, a θ_1 kut upada.

Raspršenje rezultira redistribucijom akustične energije u kutovima koji se razlikuju od upadnog kuta. Visokoporozni sedimenti, kao što su mulj i glina, imaju malu akustičku impedanciju. Iz tog razloga neće uzrokovati znatno raspršenje akustične energije, za razliku od kamenih i pješčanih vrsta morskog dna. Nepravilnosti morskog dna, hrapavost sedimenta i prostorne varijacije fizičkih svojstava sedimenata imaju najveći utjecaj na količinu raspršene energije. Snaga raspršene energije ovisi o svojstvima morskog dna i karakteristikama morske vode kao medija. Uz to, za količinu raspršene energije važan je i kut upada akustičnog vala. Dio raspršene energije koji se vrati prema izvoru naziva se povratno raspršenje.

Povratno raspršenje akustičnog vala podatak je koji se prikuplja prilikom refleksije akustične energije od morskog dna. Raspršena akustična energija prikuplja se povratkom do sonara. Sirovi podaci zahtijevaju korekcije, nakon čega se povratno raspršenje upotrebljava za interpretaciju karakteristika morskog dna (Hewitt i dr. 2010).

Nakon obrade dobivaju se podaci o jakosti povratnog raspršenja koji su vezani samo za značajke morskog dna. Snaga povratnog raspršenja smatra se jekom s morskog dna koja je ovisna o upadnom kutu, karakteristikama morskog dna i sedimenta te brzini zvuka kroz vodeni stupac. Na prikupljene podatke o povratnom raspršenju utječe mnoštvo faktora. Pod utjecajem okolišne buke mora, apsorpcije zvuka, gubitka prijenosa zvučnog vala, lokalnog nagiba morskog dna i refleksije u blizini nadira, snaga povratnog raspršenja ne očitava prave karakteristike morskog dna (Tang i dr. 2005).

Potreba za poznavanjem karakteristika morskog dna i njegovih sedimenata povećana je zbog razvoja pomorskog inženjerstva, izgradnje morskih luka i zaštite morskih staništa. Klasificirani su tipovi morskog dna, poput kameana, šljunka, pijeska i mulja, ali nije bilo moguće njihovo jasno razlikovanje. Obradeni podaci prikupljeni izmjerom višesnopnog dubinomjera segmentiraju se prema zajedničkim karakteristikama poput dubine, svojstava terena ili snage povratnog raspršenja. Kao rezultat dobivaju se batimetrijski prikazi morskog dna, prikazi nagiba terena i mnogobrojne tematske karte. Kombinacija navedenih prikaza morskog dna važna je za definiranje geologije morskog dna i morskih staništa (Brown i dr. 2019).

3. Područje istraživanja

Područje istraživanja istočna je obala Jadranskog mora, te je važno upoznati se s karakteristikama tog morskog i obalnog područja. Prema podacima Međunarodne hidrografske organizacije (IHO) i službenim standardima za hidrografsku izmjeru, tek je 37% površine Jadranskog mora adekvatno izmjereno, 47% njegove površine zahtijeva ponovnu izmjeru, a 16% površine nikada nije sustavno izmjereno.

Prema dubinama, Jadransko more karakteriziraju velike uzdužne i poprečne asimetrije. Sjeverozapadni dio bazena Jadranskog mora iznimno je plitak i počinje s dubinom od oko 15 m te se prema jugu postupno povećava, a zatim naglo doseže dubinu od oko 270 m na području Srednjeg jadranskog bazena.

Južnije se proteže oko 150 km dug i do 130 m dubok Palagruški prag, koji razdvaja Srednji jadranski bazen od mnogo dubljeg Južnog jadranskog bazena, okruglog oblika. Depresija tog područja doseže maksimalnu dubinu više od 1200 m i označava najdublji dio Jadranskog mora. Talijanska, zapadna obala relativno je pravilna dok hrvatsku, istočnu obalu karakteriziraju mnogi otoci i nepravilno dno nepravilnosti kojega se naglo povećavaju s približavanjem obali. Dodatni utjecaj na poprečne asimetrije imaju razlike u orografiji između dviju susjednih obala. Dinaridi su relativno visok planinski lanac koji se duž istočne obale nalazi u neposrednoj blizini obale, dok je na zapadnoj obali planinski lanac Apenini mnogo udaljeniji od obale (Cushman-Roisin i dr. 2001).

Oblikovanje morskog dna ovisi o pripadajućim geološkim svojstvima i ima snažan utjecaj na morske struje, lokalnu faunu i staništa na morskome dnu. Batimetrijski podaci pružaju informacije o topografiji morskog dna i temeljna su komponenta za razumijevanje dinamike mora.

Na narav jadranskog dna i njegove fizikalne i kemijske osobine – temperaturu, slanost, sadržaj hranjivih soli i prozirnost – znatno utječe geografski položaj i geološko-morfološka raskidanost obale. U svom radu Ercegović (1960) navodi postojanje četiri vrste dna Jadranskog mora: hridinasto, litotamnijsko-ljuštuno, ilovasto-glineno i pješčano dno. U cijelom istočnom Jadranu prevladavaju hridinasta dna zbog velike razvedenosti obale, a rasprostire se na dubini od plićaka do preko 100 m dubine. Litotamnijsko-ljuštuno dno najvećim se dijelom sastoji od krupnijih anorganskih ostataka različitih morskih organizama i jednim dijelom od krupnijih elemenata hridinastog dna. Ta se vrsta dna rasprostire oko plićaka i osobito u područjima vanjskih otoka srednjeg Jadrana. Cijelim srednjim i južnim dijelom Jadrana prevladava ilovasto-glineno dno, znatnije na području većih dubina Jabučke udoline i Južnog jadranskog bazena. Na Jadranu je veoma rasprostranjeno i pješčano dno, koje se sastoji od sitnih elemenata hridinastog dna ili elemenata biljno-životinjskog podrijetla.

Za predmetna istraživanja posebno su zanimljiva pješčana dna, jer se ona jako dobro detektiraju metodom povratnog šuma odnosno povratnog raspršenja.

Pješčana dna Jadranskog mora topografski mogu biti izdužena, zaobljena ili nepravilna, izdignuta od morskog dna, ali pretežno su okružena dubljim morem. Karakteristični sediment je pijesak uz prisutnost većih komada valutica ili sitnih čestica mulja. Morska staništa obitavaju u velikoj mjeri na područjima gdje pješčani sediment dolazi kao tanki sloj preko čvrste stijene te ako takva morska staništa ovise o sedimentu, a ne o stijeni ispod njega, smatraju se pješčanima.

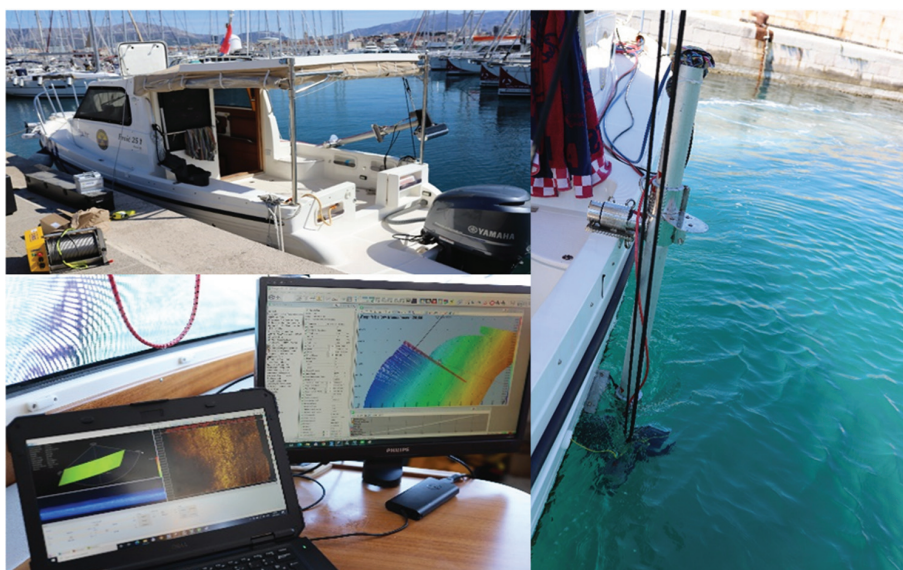
Ekološka mreža NATURA 2000 sastavljena je od područja koja čine prirodni stanišni tipovi i onih područja koja su važna za očuvanje ugroženih vrsta na teritoriju Europske unije. Najvažniji je pokretač mehanizama zaštite morskih i obalnih staništa. Temeljem kriterija NATURA 2000 poznato je šest vrsta biocenoza. Biocenoza sitnih ujednačenih pijesaka infralitoralna je stepenica koja se prostire u svim dijelovima uz istočnu obalu Jadrana (Bakran-Petricioli 2011). To područje karakterizira bujna vegetacija i najbolji ekološki uvjeti za većinu autotrofnih bentoskih organizama, a naglasak u navedenim projektima i ovom radu bit će na proučavanju morske cvjetnice *Posidonia oceanica* (L.) Delile, u daljnjem tekstu posidonija.

Posidonija je morska cvjetnica i endem Sredozemlja. Raste u uskom obalnom pojasu bistrog mora, od površine do četrdesetak metara dubine. Otporna je na izloženost valovima i velike varijacije u temperaturi mora, ali loše podnosi smanjeni salinitet i eutrofikaciju. Najrazvijenija staništa nalaze se u srednjem i južnom Jadranu, dok su u sjevernom rijetka jer je prozirnost vodenog stupca ondje manja. Rasijane primjerke moguće je pronaći na dubini većoj od 60 m (Ercegović 1960). Najrasprostranjenija je od svih ostalih morskih cvjetnica u Jadranskom moru. Naziva se „plućima mora“ jer biomasa naselja posidonije utječe na raznolikost živog svijeta s obzirom na to da se mnogobrojni organizmi u njima hrane, razmnožavaju i nalaze zaklon. Ima puzavu, položenu stabljiku koja je korijenom pričvršćena za dno. Iz stabljike se uzdižu izdanci na kojima raste 4 – 8 listova u snopu, širine oko 1 cm. Listovi mogu doseći dužinu oko jednog metra (prosječno 30 – 80 cm). Posidoniji pogoduje bistro i plitko more s mnogo svjetlosti za fotosintezu.

Terensko istraživanje u sklopu ovog rada provedeno je na nekoliko lokacija: otok Kaprije, otok Žut, otok Brač te uvala Kašjuni u Splitu. Sve navedene lokacije karakterizira kamena obala koja se prostire na morsko dno i postupno prelazi u pijesak. U batimetrijskom smislu sve lokacije karakterizira sporo povećanje dubine u odnosu na udaljenost od obale, osim otoka Žuta gdje se dubina vrlo brzo povećava već nakon nekoliko desetaka metara udaljenosti od obale. Terenskom istraživanju prethodilo je „*in situ*“ uzorkovanje sedimenta i biomase koje su obavili stručnjaci iz Instituta za oceanografiju i ribarstvo (IOR), te je na temelju toga utvrđeno da se na navedenim lokacijama nalazi posidonija i pješčani sediment. Cilj je naših istraživanja bilo utvrđivanje prostorne distribucije posidonije, pješčanog sedimenta i stijene.

4. Prikupljanje i obrada podataka

Podaci su prikupljeni pomoću suvremenog višesnopnog dubinomjera Teledyne Reason Seabat T50-R montiranog na plovilo (slika 1). Višesnopni dubinomjer Teledyne Reason Seabat T50-R karakterizira široki frekvencijski pojas rada od 190 do 420 kHz, 1024 akustične zrake te visoka kvaliteta podataka, kao i mogućnost kreiranja normaliziranog *povratnog raspršenja* za potrebe klasifikacije morskog dna. U plitkim vodama omogućuje postizanje rezolucije morskog dna 0,5° x 0,5°. Uz višesnopni dubinomjer integrirana je i inercijalna mjerna jedinica T-Series IMU-20 za potrebe navigacije te sonda za mjerenje površinske brzine zvuka u vodi Reason SVP, a obavljeno je mjerenje profila zvuka u vodi pomoću uređaja Valeport Mini SVP.



Slika 1. Plovilo za terensku izmjeru, montirana oprema za vrijeme mjerenja i programi za nadzor i prikupljanje podataka.

Prikupljanje podataka obavljeno je u frekvencijskom području rada od 380 do 420 kHz uz prikladno pojačanje povratnog akustičnog signala, duljine pulsa te apsorpcije kako bi se regulirala snaga akustičnog signala te njegova kvaliteta. Za prikupljanje podataka korišten je programski paket Teledyne PDS, a za obradu prikupljenih podataka programski paket CARIS Hips & Sips, koji pruža mogućnost integracije batimetrijskih podataka, podataka laserskog skeniranja, različitih prikaza morskog dna kao i podataka duž vodenog stupca te njihovu simultanu obradu.

Proces obrade podataka sastoji se od nekoliko koraka kojima prethodi unos relativnih pozicija između inercijalne mjerne jedinice i referentne točke višesopnog dubinomjera kako bi se mogla provesti kalibracija podatka (tablica 1), tj. eliminirati sustavne pogreške uzrokovane pozicioniranjem i montažom senzora kao što su vremensko kašnjenje i kutovi ljujanja, posrtanja i zaošijavanja, odnosno engl. *roll*, *pitch*, *yaw*. Priprema podataka također zahtijeva učitavanje datoteka izmjenjenih vrijednosti zvuka u profilu od morske površine do dna, a u ljetnom periodu potrebno je izmjeriti više profila zbog velikih temperaturnih razlika u vodenom stupcu.

Tablica 1. Rezultati kalibracije višesopnog dubinomjera na lokaciji Kašjuni.

Vremensko kašnjenje	0,00 s
Korekcija pravca kretanja	6,38°
Korekcija kuta ljujanja	-0,11°
Korekcija kuta posrtanja	0,21°

Korišteni programski paket CARIS Hip & Sips nudi čitav niz filtera i algoritama koji kao rezultat daju mozaik povratnog raspršenja visoke kvalitete na temelju kojeg je moguće provesti pouzdanu klasifikaciju podataka provedenih terenskih mjerenja. Najznačajniji algoritmi su npr. *Despeckle*, *Beam pattern* i *AVG*, kojima se provodi kompenzacija pogreške nastale zbog upadnoga kuta akustičnih zraka višesnognog dubinomjera i njihove propagacije kroz vodu. Također je omogućena primjena algoritma *Weighted Moving Average*, izraz (2), kojim se izvodi kreiranje mozaika povratnog raspršenja i pridruživanje uzorka intenziteta u pravilnoj mreži podataka, izbjegava pretjeranu interpolaciju podataka i obrađuje kompleksnu geometriju podataka mjerenja višesnognog dubinomjera:

$$z_i = \sum_{j=i-w+1}^i \omega_j x_j, \quad (2)$$

za $i \in [w, w+1, \dots, n]$, gdje je ω_j težina i x_j vremenski slijed slučajnih varijabli (Perry 2011).

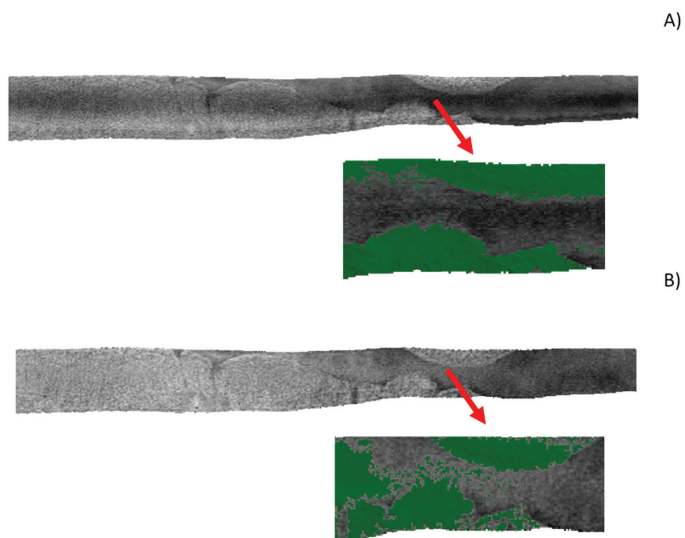
Stoga obrada podataka mjerenja zahtijeva znanstveni pristup i veliku pozornost, kako bi se osiguralo da krajnji rezultat odnosno klasifikacija odražava što realniji prikaz dna odnosno morskih staništa na konkretnoj lokaciji.

Prilikom obrade podataka odabran je pristup kreiranja mozaika povratnog raspršenja na dva načina – bez primjene uzorka akustičnih zraka (engl. *Beam pattern*) i uz njegovu primjenu u svrhu jednoznačnog definiranja granice između klasa.

5. Rezultati i diskusija

S obzirom na to da je u uvali Kašjuni na morskom dnu prisutan pješčani sediment, napravljena je klasifikacija kojom se jasno razlučuje područje pješčanog dna i morskog staništa posidonije. Izvedena je na dva načina – bez primjene uzorka akustičnih zraka i uz njegovu primjenu na kreiranje *mozaika povratnog raspršenja* (slika 2). *Uzorak akustičnih zraka* je korekcija u svrhu pokušaja kompenziranja upadnog kuta zraka na snagu povratnog raspršenja. Ona polazi od pretpostavke da se modulacija zbog različitih kutova upada i vrste tla kreće oko srednje vrijednosti. Kada postoji dovoljno velik set podataka, varijacije se izjednače i moguće je kreirati čisti *uzorak akustičnih zraka* koji se zatim eliminira iz korigiranih intenziteta za cijelo područje snimljeno višesnognim dubinomjerom.

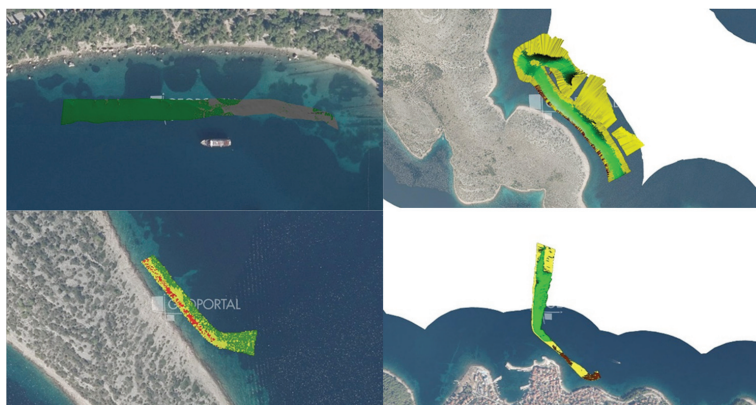
Klasifikacija je provedena na temelju analize snage povratnog raspršenja izraženog u decibelima (dB). Pri tome treba spomenuti činjenicu da se reflektirani val u blizini nadira ne može uzeti u obzir prilikom obrade podataka. To je vidljivo na slici 2(A), da duž linije snimanja, u blizini nadira, postoje praznine u klasifikaciji. Može se stoga zaključiti da je snaga povratnog raspršenja duž linije snimanja visoka, pa je u tom području klasifikacija nepouzdana.



Slika 2. Mozaik povratnog raspršenja i klasifikacija izrađeni bez primjene uzorka akustičnih zraka (A) i uz primjenu uzorka akustičnih zraka (B).

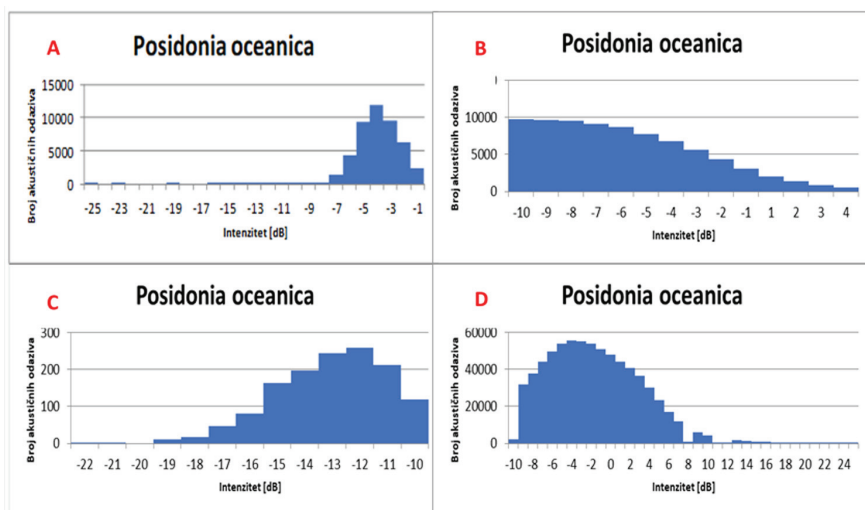
Tablica 2. Statistički podaci klasifikacije.

Posidonija		Pijesak	
Minimum	-25,120 dB	Minimum	-1,000 dB
Maksimum	-1,000 dB	Maksimum	14,709 dB
Srednja vrijednost	-3,942 dB	Srednja vrijednost	1,486 dB
Ukupan broj akustičnih odaziva	25 104	Ukupan broj akustičnih odaziva	25 104



Slika 3. Provedena klasifikacija na četiri područja: Kašuni (A), Žut (B), Kaprije (C), Brač (D).

Prilikom obrade podataka korištenjem statističkih upita i tretirajući mjerene podatke kao ordinalnu skalu, ustanovljeno je kako posidoniji na lokaciji Kašjuni pripada intenzitet *povratnog raspršenja* manji od -2 dB, a pijesku veći od -2 dB (tablica 2). Uz uvjet poznavanja intenziteta moguće je još definirati dubine i nagib dna što je također korišteno u obradi podataka.



Slika 4. Histogrami intenziteta povratnog raspršenja na četiri područja: Kašjuni (A), Žut (B), Kaprije (C), Brač (D).

Temeljni je cilj klasifikacije određivanje prostorne distribucije sedimenata morskog dna uz njihovu jasnu distinkciju prema posidoniji. Usporedbom dobivenih rezultata može se zaključiti da provedena klasifikacija uz korištenje korekcije uzorka akustičnih zraka daje bolje rezultate te omogućuje jasno definiranje prostiranja biomase, tj. posidonije na pješčanom sedimentu. Nadalje, iz priloženih grafičkih prikaza (slika 3) jasno je vidljivo kako su dobiveni podaci klasifikacije konzistentni, što pokazuje kako je predmetna metodologija prikladna za dobivanje optimalnih rezultata.

Međutim, iz slike 4 se vidi da je na različitim lokacijama (testnim područjima) izmjereni intenzitet povratnog raspršenja posidonije različit, što pokazuje kompleksnost određivanja pridnenih staništa i pokazuje da je u primijenjenoj metodologiji potreban znanstveni pristup.

6. Zaključak

Kvalitetni podaci mjerenja preduvjet su za uspješnu provedbu klasifikacije podataka. U radu je predstavljena metodologija klasifikacije morskih staništa s posebnim naglaskom na određivanje staništa posidonije. Prikupljeni su terenski podaci s odabranom četiri različita testna područja na Jadranskom moru i njihovom je obradom razrađena metodologija klasificiranja različitih tipova morskih staništa na temelju indirektna metode mjerenja.

Prikazan je znanstveni pristup klasifikaciji odnosno obradi podataka prikupljenih najsvremenijim višeslojnim dubinomjerom i ostalom hidrografskom opremom, kupljenom zahvaljujući provedbi projekta HIDROLAB.

Provedena je klasifikacija iz koje proizlazi zaključak da je za tipove dna na četiri lokacije obuhvaćene predmetnim istraživanjima najrealniju sliku distribucije sedimenata i biomase (posidonije) osigurala primjena metode određivanja koeficijenta refleksije uzorka akustičnih zraka.

S obzirom na to da se do sada klasifikacija uobičajeno obavljala „*in situ*“ uzorkovanjem sedimenta i biomase, bilo je vrlo nepraktično i ekonomski neisplativo tragati za jasnim granicama zbog velikog područja rasprostiranja. Primijenjeni novi instrumentarij i programski paketi uz znanstveni pristup u obradi podataka mjerenja znatan su napredak i višestruko brži postupak kartiranja staništa te provođenje uspješne klasifikacije.

Razvijena metodologija bit će primijenjena na ostale lokacije u Jadranskom moru u sklopu projekta „Usluga kartiranja obalnih i pridnenih morskih staništa u obalnom moru RH i pridnenih morskih staništa u hrvatskom epikontinentalnom pojasu u sklopu OPKK projekta Kartiranje obalnih i pridnenih morskih staništa na području Jadranskog mora pod nacionalnom jurisdikcijom“, pri čemu će staništa biti klasificirana prema važećoj Nacionalnoj klasifikaciji staništa Republike Hrvatske.

ZAHVALA. Predmetna znanstvena istraživanja provedena su kroz realizaciju projekta: HIDROLAB – Integrirani hidrografski sustav za održivi razvoj morskog ekosustava (KK.01.1.1.04.0053), koji je sufinanciran sredstvima Europskog fonda za regionalni razvoj, u sklopu „Operativnog programa Konkurentnost i kohezija 2014.-2020.“.

Literatura

- Bakran-Petricioli, T. (2011): Priručnik za određivanje morskih staništa u Hrvatskoj prema Direktivi o staništima EU, Državni zavod za zaštitu prirode, Zagreb.
- Boswarva, K., Butters, A., Fox, C. J., Howe, J. A., Narayanaswamy, B. (2018): Improving marine habitat mapping using high-resolution acoustic data; a predictive habitat map for the Firth of Lorn, Scotland, Continent. Shelf Res., 168, 39–47, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.09.005>.
- Brown, C. J., Blondel, P. (2009): Developments in the application of multibeam sonar backscatter for seafloor habitat mapping, Appl. Acoust., 70, 1242–1247, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.08.004>.
- 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, Estuar. Coast Shelf Sci., 92, 502–520, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.02.007>.

- Brown, C. J., Sameoto, J. A., Smith, S. J. (2012): Multiple methods, maps, and management applications: purpose made seafloor maps in support of ocean management, *J. Sea Res.*, 72, 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.seares.2012.04.009>.
- Brown, C. J., Beaudoin, J., Brissette, M., Gazzola, V. (2019): Multispectral multibeam echo sounder backscatter as a tool for improved seafloor characterization, *Geosciences*, 9, 126, <https://doi.org/10.3390/geosciences9030126>.
- Cushman-Roisin, B., Gačić, M., Poulain, P.-M., Artegiani, A. (2001): *Physical Oceanography of the Adriatic Sea*, Springer Science+Business Media Dordrecht, <http://doi.org/10.1007/978-94-015-9819-4>.
- Diesing, M., Green, S. L., Stephens, D., Lark, R. M., Stewart, H. A., Dove, D. (2014): Mapping seabed sediments: comparison of manual, geostatistical, object-based image analysis and machine learning approaches, *Continental Shelf Res.*, 84, 107–119, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.05.004>.
- Ercegović, A. (1960): Značajne crte vegetacije alga Jadranskog mora, *Acta botanica Croatica*, XVIII/XIX – 1959/1960, 17–36.
- Ferrini, V. L., Flood, R. D. (2006): The effects of fine-scale surface roughness and grain size on 300 kHz multibeam backscatter intensity in sandy marine sedimentary environments, *Mar. Geol.*, 228, 153–172, <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.11.010>.
- Hewitt, A. T., Salisbury, R., Wilson, J. (2010): Applications of Multibeam Backscatter: Using Multibeam Echosounder Backscatter to Characterize and Map Seafloor Features in Shallow and Deep Water, *Offshore Technology Conference, One Petro*, <https://doi.org/10.4043/20672-MS>.
- Hughes Clarke, J. E., Mayer, L. A., Wells, D. E. (1996): Shallow-water imaging multibeam sonars: a new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf, *Mar. Geophys. Res.*, 18, 607–629, <https://doi.org/10.1007/BF00313877>.
- Jackson, D. R., Richardson, M. D. (2007): *High-Frequency Seafloor Acoustics*, Springer New York, NY, New York, <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36945-7>.
- Kostylev, V. E., Courtney, R. C., Robert, G., Todd, B. J. (2003): Stock evaluation of giant scallop (*Placopecten magellanicus*) using high-resolution acoustics for seabed mapping, *Fish. Res.*, 60, 479–492, [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(02\)00100-5](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(02)00100-5).
- Lacharité, M., Brown, C. J., Gazzola, V. (2018): Multisource multibeam backscatter data: developing a strategy for the production of benthic habitat maps using semi-automated seafloor classification methods, *Mar. Geophys. Res.*, 39, 307–322, <https://doi.org/10.1007/s11001-017-9331-6>.
- Lucieer, V., Roche, M., Degrendele, K., Malik, M., Dolan, M., Lamarche, G. (2018): User expectations for multibeam echo sounders backscatter strength data – looking back into the future, *Mar. Geophys. Res.*, 39, 23–40, <https://doi.org/10.1007/s11001-017-9316-5>.
- Lurton, X. (2010): In: *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*, third ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany.

- Misiuk, B., Lecours, V., Bell, T. (2018): A multiscale approach to mapping seabed sediments, *PloS One* 13, e0193647, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193647>.
- Montereale-Gavazzi, G., Roche, M., Lurton, X., Degrendele, K., Terseleer, N., Van Lancker, V. (2018): Seafloor change detection using multibeam echosounder backscatter: case study on the Belgian part of the North Sea, *Mar. Geophys. Res.*, 39, 229–247, <https://doi.org/10.1007/s11001-017-9323-6>.
- Montereale-Gavazzi, G., Roche, M., Degrendele, K., Lurton, X., Terseleer, N., Baeye, M., Francken, F., Van Lancker, V. (2019): Insights into the short-term tidal variability of multibeam backscatter from field experiments on different seafloor types, *Geosciences*, 9, 34, <https://doi.org/10.3390/geosciences9010034>.
- Passaro, S., Barra, M., Saggiomo, R., Di Giacomo, S., Leotta, A., Uhlen, H., Mazzola, S. (2013): Multi-resolution morpho-bathymetric survey results at the Pozzuoli–Baia underwater archaeological site (Naples, Italy), *J. Archaeol. Sci.*, 40, 1268–1278, <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.09.035>.
- Perry, M. B. (2011): The Weighted Moving Average Technique, *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, <https://doi.org/10.1002/9780470400531.eorms0964>.
- Plets, R., Quinn, R., Forsythe, W., Westley, K., Bell, T., Benetti, S., McGrath, F., Robinson, R. (2011): Using multibeam echo-sounder data to identify shipwreck sites: archaeological assessment of the Joint Irish Bathymetric Survey data, *Int. J. Naut. Charting*, 40, 87–98, <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.2010.00271.x>.
- Plets, R., Clements, A., Quinn, R., Strong, J., Breen, J., Edwards, H. (2012): Marine substratum map of the causeway coast, northern Ireland, *J. Maps*, 8, 1–13, <https://doi.org/10.1080/17445647.2012.661957>.
- Pribičević, B., Đapo, A., Kordić, B., Pijanović, N. (2016): Mapping of underwater habitats based on the analysis of backscatter intensity of the return acoustic signal, *Annual ... of the Croatian Academy of Engineering*, 1, 79–96.
- Snellen, M., Gaida, T. C., Koop, L., Alevizos, E., Simons, D. G. (2019): Performance of multibeam echosounder backscatter-based classification for monitoring sediment distributions using multitemporal large-scale ocean data sets, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 44, 142–155, <https://doi.org/10.1109/JOE.2018.2791878>.
- Tang, Q., Zhou, X., Liu, Z., Du, A. D. (2005): Processing multibeam backscatter data, *Marine Geodesy*, 28, 3, 251–258, <https://doi.org/10.1080/01490410500204595>.
- Todd, B. J., Fader, G. B. J., Courtney, R. C., Pickrill, R. A. (1999): Quaternary geology and surficial sediment processes, Browns Bank, Scotian Shelf, based on multibeam bathymetry, *Mar. Geol.*, 162, 165–214, [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(99\)00092-4](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(99)00092-4).
- van Rein, H., Brown, C. J., Quinn, R., Breen, J., Schoeman, D. (2011): An evaluation of acoustic seabed classification techniques for marine biotope monitoring over broad-scales (>1 km²) and meso-scales (10 m² – 1 km²), *Estuar. Coast Shelf Sci.*, 93, 4, 336–349, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.04.011>.

Vrdoljak, Lj., Režić, M., Petričević, I. (2021): Bathymetric and Geological Properties of the Adriatic Sea, The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin, 93–107, <https://doi.org/10.17794/rgn.2021.2.9>.

Integrated Hydrographic System for Sustainable Development of the Marine Ecosystem

ABSTRACT. The paper presents a new methodology and results of hydrographic research on the project: *HIDROLAB – Integrated hydrographic system for sustainable development of the marine ecosystem*. The project is carried out as part of the experimental development of the system for spatial data collection using modern methods of remote sensing and analysis of the dispersion of the return acoustic signal in the entire water column with the purpose of detailed and effective mapping of underwater and coastal habitats. Existing methods have not proven to be effective enough for supplementing the map of underwater and coastal habitats of the Croatian part of the Adriatic Sea, which Directive 2014/89/EU prescribes. The coverage of the territorial sea of the Republic of Croatia with the currently mapped habitats is about 2%, and Republic of Croatia is obliged to complete this record in accordance with Directive 92/43/EEC as a basis for the assessment of the fish stock and the determination of quotas at the level of the European Union. The data collected so far on the habitats of the marine part are of different precision and formats and were collected by different methods (e.g. direct measurements and indirect modelling), which is why they are unreliable and only informative. On the other hand, a new methodology was applied, which, using a multibeam echo-sounder system, maps the seabed and marine habitats several dozen times faster, more accurately and cheaper.

Keywords: hydrographic survey, multibeam echo-sounder, backscatter, coastal habitats.

Primljeno / Received: 2022-08-24

Prihvaćeno / Accepted: 2022-09-21