



# Integracija suvremenih geodetsko-hidrografskih mjernih metoda u krškim područjima Republike Hrvatske

» Boško Pribičević » Damir Medak » Almin Đapo

**SAŽETAK.** Suvremena geodetsko-hidrografska mjerenja i na njima utemeljena znanstvena istraživanja na krškom području Nacionalnog parka Plitvička jezera, započela su s realizacijom projekta pod pokroviteljstvom UNESCO-a 2000. godine. Istraživanja su nastavljen kroz europski interdisciplinarni projekt CERGOP2/Environment 2003-2007 te nadalje uz potporu znanstvenog vijeća NP Plitvička jezera. Na Proščanskom jezeru i jezeru Kozjak ponavljana su snimanja dna pomoću ultrazvučnog dubinomjera čiji se senzori pozicioniraju integracijom sa satelitskim sustavom. U ovom se radu prikazuju primjene najsuvremenijih satelitskih i akustičkih hidrografskih mjerenja potrebnih za izradbu digitalnoga trodimenzionalnog modela dna jezera Kozjak i Proščanskog jezera, kao praćenje dinamike taloženja sedrenih naslaga kroz duže vremensko razdoblje. Obrada izmjerenih podataka izvedena je primjenom suvremenih geostatističkih metoda. Ta će geodetska istraživanja kroz vremenski niz ponavljanih opažanja i analize rezultata pridonijeti praćenju i sprječavanju procesa eutrofikacije Plitvičkih jezera te biti temelj za istraživanja drugim znanstvenim disciplinama.

**KLJUČNE RIJEČI:** dvofrekventna batimetrija, trodimenzionalni model jezera, integracija satelitskog određivanja položaja i dubinomjera, eutrofikacija, Plitvička jezera

## > 1. Uvod

Nacionalni park Plitvička jezera smješten je u dijelu Hrvatske gdje se iz sjevernoga ravničarskog prostora prelazi u uzdignutiji i okršeni planinski predio. Riječ je o specifičnom hidrogeološkom sustavu od 16 jezera koje čine vode rijeke Korane i njezinih pritoka Bijele rijeke, Crne rijeke i Rječice. Ona se kaskadno nižu i povezuju prirodnim stepenicama stvarajući prekrasne vodopade različitih visina i veličina. Cijelo zaštićeno područje Nacionalnog parka zauzima oko 295 km<sup>2</sup> ili točnije 29.482 ha površine. Od 1979. godine NP Plitvička jezera nalazi se na Listi svjetske prirodne baštine UNESCO-a.

Gornja jezera leže pretežno na nepropusnim dolomitnim slojevima, a Donja jezera protječu kroz propusne i u vodi lako topive rudistne vapnence. Nacionalni park smješten je na krškom reljefu koji karakteriziraju vrtače, uvale, pećine i podzemni vodeni tokovi. U tom okružju stijene su porozne pa kopnene vode nestaju u krškom podzemlju i prolaze kroz vrlo komplicirane podvodne kanale i prolaze. No u središtu takvog krajolika ističe se površina s velikom količinom nadzemne vode. Na toj se površini nalaze stariji slojevi, a oni uz karbonate sadrže ilovaču i laporac koji su nepropusni. Zbog toga to

područje zadržava velike volumene vode na površini. Ondje su smještene Plitvička jezera. Najvažniji su vodotoci Crna i Bijela rijeka koji postaju dijelom Plitvičkih jezera malo niže od mjesta njihova spajanja.

Dugoročno gledano, osnovna svrha tih istraživanja, zajedno s prethodnim, a i projektima koji slijede, zaštita je ekosustava Parka, održavanje prirodnog okoliša i njegovih autohtonih vrsta te očuvanje temeljnog fenomena koji će biti opisan u sljedećem poglavlju.

## > 2. Temeljni fenomen NP Plitvička jezera i njegova ugroženost

U Nacionalnom parku Plitvička jezera pregrade između jezera, preko kojih padaju slapovi i slapići, nastaju na poseban prirodni način. Pod određenim fizikalno-kemijskim i biološkim uvjetima nastaje sedra (travertin, bigar) i taloži se na dnu jezera te na potopljenim predmetima. Sedra izgrađuje podvodne pragove i pregrade (barijere) koje se izdižu iznad vode rastući stalno u visinu i širinu. Upravo je stalno stvaranje sedre, uz toplu klimu i bujnu vegetaciju te ne narušenu prirodnu ravnotežu, prvi čimbenik zbog kojeg su Plitvička jezera postala dio Svjetske pri-

rodne baštine.

Sedra se taloži na dnu Plitvičkih jezera u obliku mikroskopski sitnih kristalica koji dno jezera oblažu debelim slojem sprječavajući tako gubitak vode kroz rupičastu, kršku podlogu. Zahvaljujući tomu, velika Gornja jezera (Proščansko jezero i Kozjak), koja leže na dolomitnoj podlozi, ne gube vodu, ali već nakon početka toka rijeke Korane voda se gubi u podzemlje jer prestaju procesi sedrenja.

Danas se na području NP Plitvička jezera mogu detektirati mjesta gdje je sedrenje izostalo ili je intenzitet sedrenja smanjen. Provedena znanstvena istraživanja dokazala su da povećana količina otopljenih organskih tvari (zagadenja) zaustavlja procese sedrenja na Plitvičkim jezerima. Dakle, ondje se događa neumitan proces eutrofikacije ili proces *starenja jezera*, što je inače prirodni proces koji traje stotinama godina, ali ga čovjek svojim djelatnostima (poljoprivreda, stočarstvo, turizam, otpadne vode naselja i hoteli) može znatno ubrzati. Eutrofikacija je proces obogaćivanja voda hranjivim tvarima koje pospješuju rast vodenih biljaka kao što su planktonske alge i alge dna te više vodene biljke. Plitvička jezera danas su obrasla močvarnom vegetacijom, a dno jezera prekriveno je podvod-

nim livadama. Na sedrenim barijerama sve su deblja stabla koja svojom težinom ugrožavaju njihovu statiku prijeteći urušavanjima slapova. Sama eutrofikacija je inače normalan prirodni proces starenja jezera kroz tisuće godina, dok antropogenu eutrofikaciju uzrokuje čovjek svojim djelatnostima, a ona može uništiti vodeni ekosustav u vrlo kratkom vremensku roku. Očigledno je da je posljednjih desetljeća Plitvička jezera zahvatio proces antropogene eutrofikacije.

### > 3. Osnove refleksije i povratno rasipanje zvučnog vala od različitih slojeva

Prvi aspekt podvodne akustike koji ćemo analizirati povezan je sa širenjem zvučnih valova u vodi. Prvi efekt širenja vala odnosi se na opadanje amplitude signala s geometrijskim efektom s jedne strane i apsorpcijom s druge strane. ApSORPCija je povezana s kemijskim svojstvima morske vode i ključni je čimbenik u širenju podvodnih zvučnih valova; ograničava njihovo područje na visokim frekvencijama. Procjena gubitaka širenja valova bitan je čimbenik izvedbe sonarnih sustava.

#### 3.1 BRZINA ZVUKA U VODI

Brzina širenja zvučnih valova ovisi o karakteristikama medija kojim se valovi šire: ovisi o gustoći  $\rho$  i modulu elastičnosti  $E$ :

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

U morskoj vodi brzina zvučnog vala iznosi oko  $c = 1.500$  m/s (uglavnom je između 1.450 m/s i 1.550 m/s, što ovisi o tlaku, salinitetu i temperaturi). Gustoća morske vode iznosi približno  $\rho = 1.030$   $\text{kgm}^{-3}$ , dok je gustoća slatke vode nešto niža ( $1.000$   $\text{kgm}^{-3}$ ) (Ingham 1992).

U morskim sedimentima (talogu) koji se u prvom približenju smatraju tekućim medijem, gustoća varira između  $1.200$   $\text{kgm}^{-3}$  i  $2.000$   $\text{kgm}^{-3}$ . U zasićenim sedimentima brzina je proporcionalna brzini u vodi pa brzina zvuka varira između 1.500 m/s i 2.000 m/s.

#### 3.2 FREKVENCIJA I VALNA DULJINA

Zvučni valovi općenito nisu trenutačne smetnje (perturbacije), nego stalne vibracije. Karakterizira ih frekvencija  $f$  (broj vibracija u sekundi, izražena u Hz) ili period  $T$  (period elementarne promjene, povezan s frekvencijom preko izraza  $T = 1/f$ ). Frekvencije koje se koriste u podvodnoj akustici variraju od 10 Hz do 1 MHz, ovisno o primjeni, tj. u periodima

od 0,1 s do 1  $\mu\text{s}$  (Lurton 2002).

Valna duljina prostorni je interval između dviju točaka medija, a prolazi kroz iste vibracije s fazom višekratnikom od  $2\pi$ . Drugim riječima, to je udaljenost koju val prijeđe tijekom jednog perioda signala s brzinom  $c$ . Slijedi :

$$\alpha = cT = \frac{c}{f}$$

Zvučni efekti dna dosta su kompleksniji od efekta površine. Vidljivi su različiti procesi, a njihova relativna važnost ovisit će o frekvenciji signala.

Jezersko se dno općenito ponaša kao gruba površina, zato raspršuje upadne zvučne valove. Tako raspršen povratni val signal je koji koriste svi podmorski kartirajući sonari.

Značajan dio ulazne energije može prodrijeti u dno zbog malog kontrasta otpora između vode i sedimenata. ApSORPCija unutar sedimenata mnogo je veća nego u vodi (obično 0,1 dB do 1 dB / valna duljina). No, niske se zvučne frekvencije mogu širiti sa znatnom razinom.

Procesi slični onima kod širenja vala u vodi (tj. unutarnja refrakcija i refleksija) mogu se javiti i unutar sedimenata. Sedimenti mogu isto tako pokazati profile brzine zvuka i gustoće s gradijentima i diskontinuitetom, zbog geoloških procesa u slojevima.

#### 3.3 REFLEKSIJA

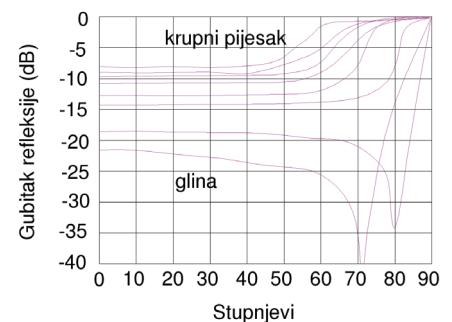
Zvučni će se val prilikom širenja kroz more ili jezero vrlo često sudariti sa zaprekama u vodi (ribe, planktoni, mjehurići, podmornice), ili s granicama medija (morsko ili jezersko dno i morska ili jezerska površina). Te će zapreke poslati natrag sonarnom sustavu neke odjeke odaslanog signala, a dio će primiti sonarni sustav. Ti će odjeci biti ili poželjni (ako je zapreka željeni cilj) ili nepoželjni (ako smetaju korisnom signalu). U svakom slučaju, razumijevanje njihovih svojstava vrlo je bitno za dobro funkcioniranje sonarnog sustava jer se odjeci moraju primiti pod najboljim uvjetima; moraju se ili reducirati ili filtrirati (Lazarević 1987).

Refleksija zvuka na površini vodenih sedimenata najprikladnije je opisana s koeficijentom refleksije tekuće površine. Može uključivati efekt »odsječenog« vala, važan za pješčane sedimente. Za račun mikroskale hrapavosti, gubitak koherentne refleksije može biti dodan koeficijentu refleksije. Rezultat je tada ovisan o frekvenciji.

Na niskim frekvencijama (ispod nekoliko kHz) treba modelirati interakciju vala sa slojem sedimenta, i to što je fre-

kvencija niža, na dubljoj razini. Značajni procesi tada nisu nepravilnosti reljefa i malene heterogenosti okoliša, nego brzina zvuka/gustoća profila i najčešće njihov diskontinuitet. Takvo zvučno ponašanje primjenjuje morska geologija i geofizika (seizmika, profiliranje sedimenata). U praksi, zvučna se energija može reflektirati na površinama među slojevima. Može doći i do refrakcije zbog profila brzine zvuka u sedimentima.

Na mjestima snažnih dodira i niskih frekvencija može se promatrati površina valova kako se širi na granici između slojeva različitih karakteristika. Ti će se valovi razlikovati po prirodi površine. Ta je činjenica iskorištena u tehnikama refleksije kod seizmike (geologija, geofizika).



Slika 1. Koeficijenti refleksije na površini pojedinih vodenih tipova sedimenata

### > 4. Snimanje jezera Kozjak i Prošćanskog jezera s analizom rezultata mjerenja

Suvremena geodetsko-hidrografska mjerenja i na njima utemeljena znanstvena istraživanja na području Nacionalnog parka Plitvička jezera započela su realizacijom projekta pod pokroviteljstvom UNESCO-a 2000. godine (Medak i Pribičević 2000). Istraživanja su nastavljena kroz europski interdisciplinarni projekt CERGOP2/Environment 2003-2007 (Medak i Pribičević 2004), (Pribičević i Medak 2001), te nadalje uz potporu znanstvenog vijeća NP Plitvička jezera. Na Prošćanskom jezeru i jezeru Kozjak ponavljana su snimanja dna s pomoću ultrazvučnog dubinomjera čiji se senzori pozicioniraju integracijom sa satelitskim sustavom.

#### 4.1 KARAKTERISTIKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

Jezero Kozjak se nalazi na nadmorskoj visini od 534 m, najveća dubina mu je 46 m a površina 0,83  $\text{km}^2$  i ono je najveće i najdublje od svih Plitvičkih jezera. Proteže se u smjeru sjeverozapad – jugoistok, dužine 2.350 m i širine od 135 m do 670 m.

Prošćansko jezero, ima najveću nadmorsku visinu u sustavu od 16 jezera. U

jezero utječe stalni vodotok Matica, odnosno spojene vode Crne i Bijele rijeke. Jezero se nalazi na nadmorskoj visini od 636 m, površina mu je 0,68 km<sup>2</sup>, a najveća dubina od 37 m ispred Osmanove drage, odnosno na 370 m udaljenosti od Labudovačke barijere. Dužina je jezera 2100 m, a širina mu varira od 180 do 400 m. Na početku jezera u smjeru zapada odvaja se Liman draga (od turskoga *liman*: zaljev) dužine 900 m.

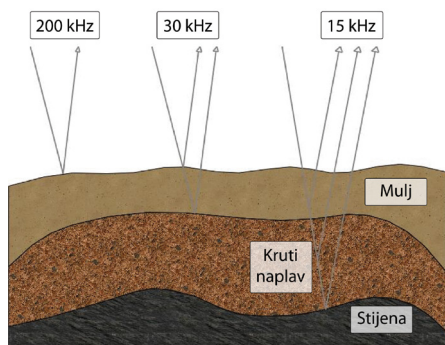
## 4.2 DVOFREKVENTNA BATIMETRIJA

Na području NP Plitvička jezera zaštićeno je izvoditi istražna bušenja radi određivanja debljine naslaga sedre pa je za provedbu predmetnih istraživanja odabrana metoda dvofrekventne batimetrije, koja se najčešće koristi za snimanje podvodnih naslaga i taloga. Princip je vrlo jednostavan: istodobno se koriste dvije sonde s različitom frekvencijom. Sonda s višom frekvencijom generira signal koji se reflektira od prve prepreke na koju naiđe (i meki i tvrdi materijal), a sonda s niskom frekvencijom odašilje signal koji prolazi kroz mekše materijale (mulj, šljunak i sl.). Usporedbom rezultata dobiju se područja na kojima se nalaze naslage te njihova debljina (Pribičević 2005).

Kada je dno mora, rijeke ili jezera sastavljeno od slojeva različitih materijala, koji se preklapaju jedni preko drugih, dubinomjer će prepoznati različite slojeve pri niskim frekvencijama, a pri visokim će frekvencijama prepoznati samo najviši sloj. Analogno širenju kroz vodu i u slojevima dna signali niže frekvencije slabije se prigušuju pa će prodirati dublje u dno. Ovisno o frekvenciji zvučnog vala, odaslani signal reflektira se od različitih gustoća na koje nailazi pri rasprostiranju. Niže frekvencije, od 7 do 15 kHz, prodiru duboko u slojeve dna i mogu odrediti granice svih slojeva do čvrste stijene. Takvi uređaji koji rade na najnižim frekvencijama često se nazivaju i sedimentni (sub-bottom) profileri jer najčešće služe za dobivanje informacija o slojevima dna. Frekvencije od 15 do 30 kHz služe za određivanje granice između vode ili mulja i stijena. Valovi visokih frekvencija, 100 do 300 kHz, reagiraju na malu promjenu gustoće tako da mogu otkriti granicu prijelaza vode u mulj (Lachapelle 2002).

Moderni dvofrekventni uređaji koriste i visoke i niske frekvencije tako da mogu određivati različite gustoće slojeva pa se koriste za istraživanje sastava morskog dna (Müller i Wunderlich 2003). Dubinomjeri s frekvencijama 7 do 15 kHz služe za mjerenje u oceanima (doseg i do

15 km), frekvencije 15 do 50 kHz za dubine 1 do 8 km, a frekvencije 100 do 300 kHz služe za dubine do 1 km (Slika 3).



Slika 2. Slojevi morskog dna

## 4.3 PLANIRANJE I PRIPREMA MJERENJA

Kao priprema za izvođenje batimetrijskih mjerenja na Proščanskom jezeru izvršena je vektorizacija granice jezera s karte TK Plitvice 22, mjerila 1:5000, korištenjem programskog paketa AutoCad-Map. Granica jezera georeferencirana je i učitana u programski paket Hypack Max kao pozadinska (*background*) datoteka čime je dobiven položaj jezera u prostoru. Na osnovi dobivenih granica jezera planirana su mjerenja, odnosno planirane su linije snimanja jezera.

S pomoću izračunanih sedam parametara Helmertove transformacije, u programskom paketu Hypack Max, omogućeno je dobivanje koordinata sonde u realnom vremenu primjenom RTK metode satelitskog određivanja položaja. Programski paket Hypack Max automatski preračunava koordinate dobivene s pomoću GPS-a u koordinate u Gauss-Krügerovoj projekciji. Transformacijski parametri određeni su korištenjem programskog paketa Trimble Geomatics Office s pomoću koordinata točaka GPS-mreže na plitvičkom području i prikazani su u tablici 1.

Parametar	Vrijednost
Rotacija po osi x	0° 00' 04,840951"
Rotacija po osi y	0° 00' 01,776092"
Rotacija po osi z	- 0° 00' 06,976504"
Translacija duž osi x	- 572,238 m
Translacija duž osi y	- 41,289 m
Translacija duž osi z	- 461,508 m
Faktor mjerila (ppm)	- 4,431

Tablica 1. Transformacijski parametri za područje Nacionalnog parka Plitvička jezera

Korištenjem vektorizirane i geokodirane granice jezera unutar programskog paketa Hypack Max, izrađen je plan snimanja jezera odnosno ucrtane su linije snimanja jezera. Planirane linije snimanja predstavljale su orijentaciju prilikom

plova i mjerenja. Na ekranu prijenosnog računala u realnom vremenu dobivan je položaj broda na jezeru te njegov odmak od linije snimanja. Na taj je način olakšano upravljanje brodom po planiranim linijama snimanja. Razmak između linija snimanja ovisi o karakteristikama dna pa je kod uzdužnih i poprečnih linija snimanja iznosio 40 m. U slučaju potrebe, linije snimanja moguće je progustiti za vrijeme procesa mjerenja. U najbližoj okolini jezera odabrane su najpogodnije stalne geodetske točke kao bazne točke za GPS-RTK metodu određivanja položaja (Pribičević i Medak 2004).

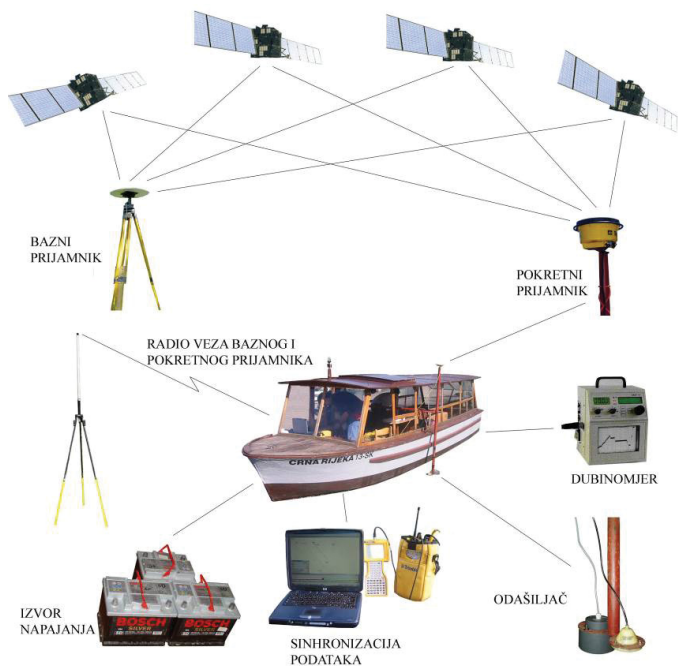
## > 4.4 Izvođenje mjerenja i obradba podataka

### 4.4.1 IZVEDENA MJERENJA

Batimetrijska mjerenja na Proščanskom jezeru izvedena su od 9. do 13. lipnja 2004. Jedna od specifičnosti izvedenih batimetrijskih mjerenja bila je integracija različitih mjernih sustava, kako bi se odredile koordinate sonde dubinomjera u realnom vremenu i odgovarajuća dubina na tome mjestu. U tu je svrhu korišten GPS-uređaj marke Trimble 5700 (baza i rover) i dubinomjer Atlas Deso 14. Svi su uređaji spojeni na prijenosno PC računalo, te integrirani u programskom paketu Hypack Max (Slika 3). Baza GPS-RTK uređaja bila je postavljena na prije navedenim geodetskim točkama uz obalu jezera, dok je rover bio postavljen na konstrukciji s bočne strane čamca na kojoj su bile postavljene i dvije sonde, uronjene oko pola metra u vodu. Postavljanjem GPS-RTK antene i sonde u vertikalnu izbjegnuto je uvođenje lateralnog offseta u računanje položaja sonde. Tako je izmjerena dubina položajno odgovarala koordinatama dobivenima GPS-om te ih je bilo potrebno reducirati samo za vertikalnu udaljenost između faznog centra GPS antene i sonde. Kako bi se dobila prava vrijednost dubine jezera, tj. prava visina i položaj u prostoru, bilo je potrebno reducirati podatke obaju mjernih uređaja (GPS i dubinomjer) na trenutačnu površinu jezera.

Jezero je trebalo snimiti s dvije frekvencije, a budući da je Atlas Deso 14 dubinomjer koji ne podržava istovremeni rad dvama sondama odnosno frekvencijama, mjerenja su izvedena prvo s visokofrekventnom sondom te s niskofrekventnom sondom, odnosno po projektiranim linijama snimanja plovilo se dva puta.

Na temelju razlike izmjerenih dubina dvjema sondama odredit će se debljina naslaga sedre u Proščanskom jezeru. Tijekom izvođenja mjerenja niskofrekventnom sondom uočeni su skokovi u dubini



Slika 3. Kombinacija GPS-RTK mjerenja i dubinomjera

na relativno plitkom dijelu jezera. Stoga su izvedene i kose linije snimanja na kojima su izvedena ukupno 34 mjerenja s velikom (anomalnom) dubinom.

Recentna mjerenja na jezeru Kozjak su zbog vremenskih uvjeta i kompleksnosti pripreme za nesmetano obavljanje mjerenja izvedena u dva vremenska razdoblja. Prvo razdoblje je bilo od 21. do 23. rujna 2009. godine, a drugo od 14. do 16. listopada 2009. godine kada su završeni terenski radovi.

Za određivanje dubina korišten je najsuvremeniji dvofrekventni ultrazvučni geodetski dubinomjer Atlas DESO 350M te viskofrekventna (210 kHz) i niskofrekventna (33 kHz) sonda. Postavke dubinomjera se kontroliraju programskim paketom Atlas Deso Control. Raspon dubina koje je moguće odrediti ovim uređajem iznosi od 0,3 m do 1.500 m. Glavna karakteristika uređaja jest kompaktnost i mobilnost uz poboljšane karakteristike određivanja i praćenja dna te mogućnost kontrole frekvencije niskofrekventne sonde pri penetraciji kroz gornje slojeve sedimenta. Navedeni dubinomjer primjenu

nalazi prvenstveno u određivanju naslaga mulja u lukama i riječnim kanalima, ali se može koristiti i kod studija u određivanju viših slojeva sedimentnih struktura.

Za planiranje, prikupljanje i obradu sirovih podataka mjerenja korišten je programski paket Hypack MAX 2009. Prije samog mjerenja prikupljena je podloga za izradu planiranih linija snimanja kako bi se zadovoljili uvjeti određeni projektnim zadatkom. Zatim se pristupilo prikupljanju podataka. Prikupljeni podaci su obrađeni te analizirani i prikazani u obliku modela u programskim paketima Golden Software Surfer 8 i AutoDesk Civil 3D 2009.

#### 4.4.2 GEOSTATISTIČKA INTERPOLACIJA

Variogram je jedan od osnovnih geostatističkih alata koji služi za određivanje ponašanja odabrane varijable u prostoru. Drugim riječima, definiramo njezinu prostornu zavisnost. Variogram, za uzorak na udaljenosti  $d$ , je polovina srednje kvadratne razlike između svih parova uzoraka koji se nalaze na udaljenosti  $d$ . To označavamo s  $\gamma(d)$



Slika 4. Prikaz instrumentarija i opreme za izvođenje hidrografskih mjerenja

$$\gamma(d) = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} [f(x_i) - f(x_{i+1})]^2$$

Variogram često nazivamo semivariogramom koji ima jednaka svojstva osim što su obje strane variogramske jednadžbe podijeljene s vrijednošću 2.

Variogram je definiran izrazom:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \times \sum_{n=1}^{N(h)} [z(u_n) - z(u_n + h)]^2$$

pri čemu je:

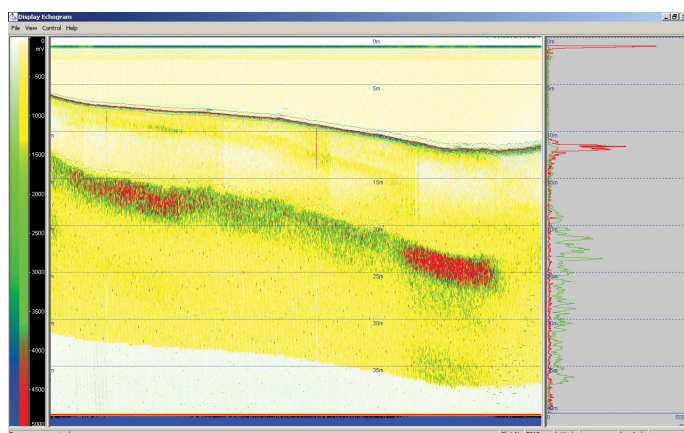
$2\gamma(h)$  - variogram

$N(h)$  - broj parova podataka uspoređenih na udaljenosti  $h$

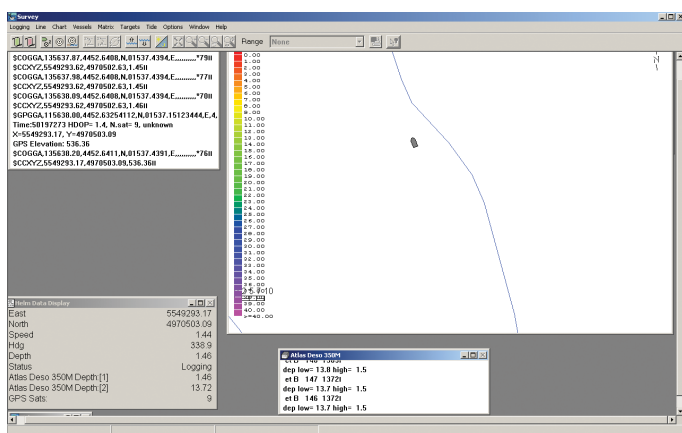
$Z(u_n)$  - vrijednost varijable na lokaciji  $u_n$

$Z(u_n + h)$  - vrijednost varijable na lokaciji udaljenoj za  $h$  od početne lokacije  $u_n$

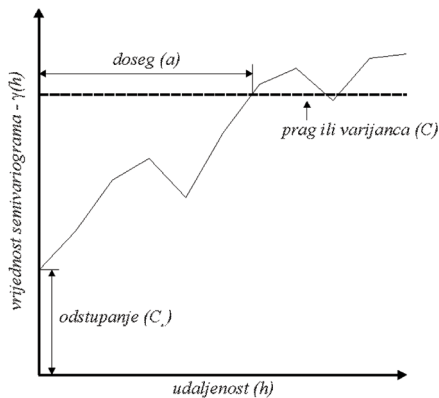
Interpolacija je obavljena kriging-metodom u programskom paketu Golden Software Surfer 8. Kriging je geostatistička metoda interpolacije koja omogućuje izračunavanje vrijednosti atributa za svaku točku pravilnog rastera iz nepravilno raspoređenih ulaznih podataka. Kriging kao metoda interpolacije zadržava trendove koji su izraženi u ulaznim podacima, tj. zadržava i ne mijenja njihove vrijednosti u postupku interpolacije već ih uzima kao fiksne (Cressie 1991). Time



Slika 5. Prikaz ehograma iz programa Atlas DESO Control



Slika 6. Prikaz u Survey načinu rada



Slika 7. Parametri variograma za geostatističku interpolaciju mjenjenih podataka



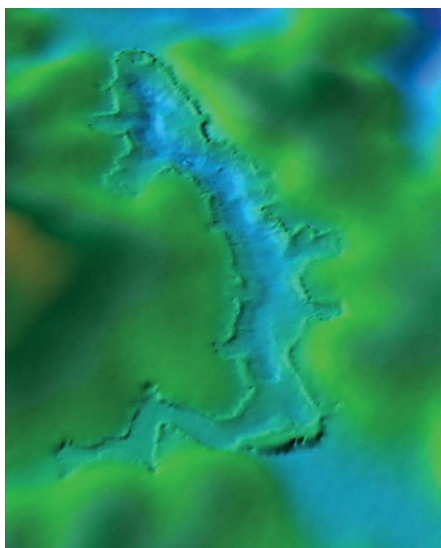
Slika 8. Trodimenzionalni geodetski model jezera Kozjak

predstavlja idealan izbor za interpolaciju ulaznih podataka koji su korišteni za tvorbu 3D geodetskog modela jezera Kozjak.

Analizom podataka mjerenja došlo se do zaključka da podaci niskofrekventne sonde prate trend pada terena uz rubna područja jezera. Detaljan prikaz primjene geostatističkih metoda interpolacije na jezeru Kozjak dat je u (Medak i dr. 2008).

#### > 4.5 Izradba 3D modela Proščanskog jezera

Programski paket Golden Surfer omogućuje izradbu trodimenzionalnog prikaza Proščanskog jezera i okolnog terena (Slika 9) iz obrađenih podataka mjerenja. Za to je potrebno sastaviti ASCII datoteku s txt-ekstenzijom u kojoj se nalaze položajne i visinske koordinate svih točaka jezera i terena. Podaci za okolni teren dobiveni su na osnovi digitalizirane karte TK 25 Plitvice u mjerilu 1:5 000. Ta datoteka služi kao ulazna datoteka za



Slika 9. Geodetski trodimenzionalni model Proščanskog jezera i okolnog terena

stvaranje prostorne mreže (grida), tj. za postupak interpolacije kojom se dobiva gušća, pravilnija prostorna mreža koordinata, koja služi za tvorbu trodimenzionalnog modela.

#### 4.5.1 ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKE DNA JEZERA

Karakteristiku dna moguće je odrediti na temelju gubitka refleksije, kao i na temelju mjerenih profila, gdje do izražaja dolazi iskustvo opažачa. Ako je profil »gladak« tada je dno prekriveno muljem ili u ovom slučaju sedrom (Slika 10).

Ako je dno prekriveno travom, profil će biti neravan. To najviše dolazi do izražaja uz rubove jezera, gdje se spajaju kopno i voda pa je vegetacija u tom dijelu raznolika (Slika 11).

#### > 4.6 Analiza anomalija izmjerenih dubina

Prilikom obradbe rezultata mjerenja niskofrekventnom sondom uočeni su na dvije odvojene lokacije veliki skokovi dubina s maksimalnom izmjerenom vrijednošću od čak 447,72 m (Tablica 2). Zbog toga su te vrijednosti izmjerenih velikih dubina bile posebno analizirane. U tu je svrhu korišten modul Single Beam Editor

kako bi se izbrisali svi profili ili dijelovi profila koji su prikazivali realno dno. Na taj su način dobiveni samo dijelovi profila na mjestima velikih dubina. Te su »rupe« vizualizirane s pomoću programa Surfer 8 kako bi se utvrdio eventualni trend. Kao što se vidi na slici 12, postoji jasna naznaka trenda pružanja anomalnih dubina.

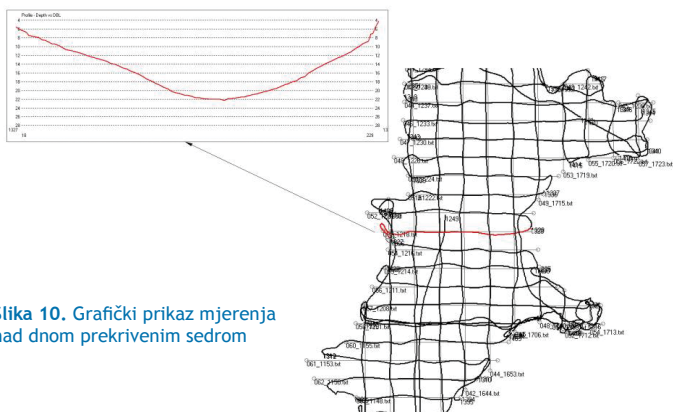
Kako bi se objasnili ti skokovi dubina, u istraživanje su uključeni stručnjaci iz područja podvodne akustike i geologije. Iskustva iz podvodne akustike ne mogu objasniti takve rezultate mjerenja. No kako su obavljena mjerenja bila konzistentna, tj. uvjeti su bili gotovo identični, izmjerene dubine ne mogu biti slučajne ili grubo pogrešne jer je tijekom mjerenja jasno uočen pravilan raspored tih anomalno velikih dubina (Slika 13). Iz tog razloga te zbog specifičnog sastava tla Plitvičkih jezera zatraženo je geološko mišljenje. Provedenom zajedničkom analizom utvrđeno je da prisutnost tektonskih rasjeda korelira s pojavom anomalija izmjerenih dubina. To bi se moglo protumačiti time da se ispod nataloženog sloja sedre nalaze šupljine ili kaverne koje su otkrivene mjerenjem niskofrekventnom sondom. No za donošenje konačnih zaključaka potrebno je izvršiti ponavljanje hidrografskih mjerenja istim i drugim uređajima kako bi se naši zaključci o razlogu pojave anomalnih vrijednosti dubina potvrdili ili odbacili (Pribičević i dr. 2007).

#### > 4.7 Ocjena točnosti provedenih mjerenja

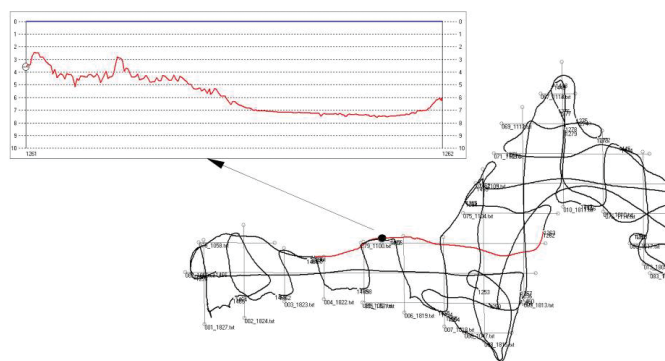
Na točnost mjerenja integracijom uređaja GPS/dubinomjer utječu tri pogreške:

- pogreška GPS-mjerenja
- pogreška mjerenja dubina
- pogreška određivanja položaja sonde s obzirom na antenu pokretnoga GPS- prijammnika.

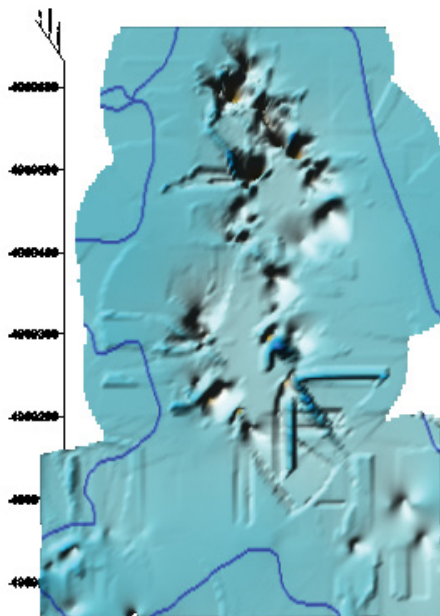
Standardno odstupanje GPS-mjerenja sastoji se od horizontalne ( $\pm 1$  cm) i vertikalne ( $\pm 2$  cm) komponente, a standardno odstupanje mjerenih dubina izno-



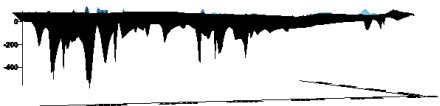
Slika 10. Grafički prikaz mjerenja nad dnom prekrivenim sedrom



Slika 11. Grafički prikaz mjerenja nad travnatim dnom



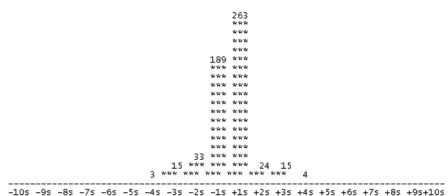
Slika 12. Položajni prikaz anomalija



Slika 13. Karakteristični profil izmjerenih anomalnih dubina

si  $\pm 2$  cm (vert.). Nesigurnost određivanja položaja sonde s obzirom na fazni centar antene pokretnoga GPS-prijamnika:  $\pm 2$  cm (hor). Prema zakonu o prirastu pogrešaka, ukupno standardno odstupanje obradenih mjerenja iznosi  $s_{hor} = \pm 2,3$  cm i  $s_{vert.} = \pm 2,8$  cm.

Programski paket Hypack Max daje ocjenu točnosti mjerenja u obliku tekstualne datoteke. U tom statističkom izvješću prikazane su distribucija mjerenja, standardna devijacija te srednja pogreška mjerenja. Mjerenja su pouzdana, što potvrđuje činjenica da je samo sedam mjerenja izvan  $\pm 3 \sigma$  (Slika 14).



Slika 14. Distribucija mjerenih dubina

## > 5. Zaključak

Moderne geodetske metode mjerenja omogućuju vrlo točno i jednoznačno definiranje diskretnih točaka na Zemljinoj fizičkoj površini, uključujući i točke na vodenim površinama ili njihovu dnu s obzirom na njihov položaj u prostoru. Ta činjenica omogućava geodetskim stručnjacima uključivanje u interdisciplinarna

istraživanja kojima je svrha očuvanje i zaštita Plitvičkih jezera od daljnjeg negativnog čovjekova utjecaja i zaustavljanje procesa eutrofikacije odnosno *starenja* jezera.

Obzirom da se radi o nacionalnom parku gdje su zbog osjetljivosti jedinstvenog ekosustava zabranjene agresivne metode kao što su istražna bušenja, za istraživanje debljine sloja nataložene sedre odabrana je metoda dvofrekventne batimetrije.

U radu se prikazuju znanstvene osnove i metodologija koja je korištena pri modernim geodetskim mjerenjima na području plitvičkih jezera Kozjak i Prošćansko, njihova obradba te izradba digitalnoga trodimenzionalnoga geodetskog modela jezera. Taj 3D model postaje podloga stručnjacima ostalih srodnih i drugih znanstvenih disciplina pri donošenju odluke o načinu i obliku zaštite temeljnog fenomena na području Plitvičkih jezera.

Analizom mjerenja metodom dvofrekventne batimetrije, došli smo do zanimljivih podataka. Koristeći dvije sonde s različitim frekvencijama (33 KHz i 210 KHz) dobili smo modele dviju razina dna: gornje, od koje se odbijaju valovi više frekvencije i donje, od koje se odbijaju valovi niže frekvencije. Usporedbom dubina iz tih dvaju modela dobili smo njihovu razliku, odnosno debljinu sloja nataložene sedre na dnu jezera. Ovdje treba naglasiti da je postignuta točnost primijenjene metode u potpunosti zadovoljavajuća obzirom da se radi o mjerenjima koja se planiraju izvoditi kroz dugo vremensko razdoblje.

Mjerenja su pokazala da metoda dvofrekventne batimetrije ima široke mogućnosti primjene u istraživanju krških tvorevina radi njihove zaštite. Međutim, osim ekološko-znanstvene primjene, dvofrekventna batimetrija može se primijeniti i na mnoge probleme koji su također vezani uz gospodarenje prirodnim resursima: izmjeru debljine mulja na akumulacijskim jezerima, određivanje zaliha šljunka na eksploatacijskim poljima (šljunčarama), te za detekciju cjevovoda (npr. plinovoda ili naftovoda) zakopanih ispod dna mora, jezera ili rijeke.

Na kraju treba napomenuti da je zbog izmjerenih velikih dubina na sjevernom dijelu jezera, potrebno ponovno provesti hidrografsku izmjeru kako bi se dobili konkretni zaključci. Tako ćemo ustanoviti točnu geološku strukturu sedimentnih slojeva dna jezera. Povežemo li te podatke s podacima drugih znanstvenih disciplina i podacima o rasjedima, moći ćemo objasniti pojavu izmjerenih anomalno velikih dubina.

## ZAHVALA:

Predmetna istraživanja omogućili su svojom financijskom potporom UNESCO, Europska komisija (međunarodni znanstveni projekt CERGOP-2/Environment kroz 5. okvir Europske zajednice Contract No. EVK2-CT-2002-00140), Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske, NP Plitvička jezera te im autori ovom prilikom zahvaljuju.

## > Literatura:

- » Cressie, N (1991): Statistics for Spatial Data. John Wiley & Sons, New York.
- » Ingham, A. E. (1992): Hydrography for the Surveyor and Engineer. Oxford, Blackwell Scientific Publications; London. Third edition revised by V. J. Abbot.
- » Lachapelle, G. (2002): Hydrography. TU Delft, Netherlands.
- » Lazarević, Ž. (1987): Tehnička hidroakustika, Mornaričko-tehnička uprava, Beograd.
- » Lurton, X. (2002): An Introduction to Underwater Acoustics; Principles and Applications Springer.
- » Medak D., Pribičević B. (2000): A Dynamic Three-dimensional Model of the National Park Plitvice Lakes, Barriers and Tributary Streams. UNESCO World Heritage Project Final Report Contract No. 700.759.9. Zagreb, Pariz.
- » Medak D, Pribičević B. (2004): Research on the International Geodynamic Test-Area Plitvice Lakes within CERGOP-2 Project. Reports on geodesy, Warsaw University of Technology, 81–88.
- » Medak D., Pribičević B., Krivoruchko K. (2008): Geostatistička analiza batimetrijskih mjerenja na primjeru jezera Kozjak, Geodetski list 62(85), 3, 131-142.
- » Müller S, Wunderlich J. (2003): Detection of embedded objects using parametric sub-bottom profilers. Int. Hydrographic Review 4(3), 76-82.
- » Pribičević B., Medak D. (2001): Programme of Geodynamic and Environmental Studies in the Region of Plitvice Lakes. Reports of Geodesy No. 2: Warsaw University of Technology, 219–224.
- » Pribičević B., Medak D. (2004): Geodetska istraživanja na Plitvičkim jezerima godine 1996. do 2000., Plitvička jezera, Plitvički bilten br. 6.
- » Pribičević B. (2005): Pomorska geodezija, Sveučilišni udžbenik, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- » Pribičević B., Medak D., Kordić B. (2007): Primjena dvofrekventne batimetrije u određivanju sedrenih naslaga, Geodetski list, 1-18. ■