

UDK 528.024.8:551.46.082:520.6.05:552.53:556.55(497.5)  
Izvorni znanstveni članak

# Primjena dvofrekventne batimetrije u određivanju sedrenih naslaga

Boško PRIBIČEVIĆ, Damir MEDAK, Branko KORDIĆ – Zagreb\*

*SAŽETAK.* Na Prošćanskom jezeru snimano je dno s pomoću ultrazvučnog dubinomjera čiji se senzori pozicioniraju integracijom sa satelitskim sustavom. Jezero je snimano primjenom dvofrekventne batimetrije, odnosno dvjema sondama: sondom visoke frekvencije (210 kHz), koja se reflektira od dna i s pomoću koje se dobiva batimetrijska snimka dna jezera, te sondom niske frekvencije (33 kHz), koja probija prvi sloj nataložene sedre i odbija se od prve tvrde prepreke (stijene). Na taj je način moguće definirati trodimenzionalni položaj dna jezera u prostoru te odrediti debljinu nataložene sedre u jezeru. Svrha je ovog rada prikaz primjene najsvremenijih satelitskih i akustičkih hidrografskih mjerenja potrebnih za izradbu digitalnoga trodimenzionalnog modela dna Prošćanskog jezera i praćenje dinamike taloženja sedrenih naslaga. Ta će geodetska istraživanja kroz vremenski niz ponavljanih opažanja i analize rezultata pridonijeti sprečavanju 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.

## 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.

\* Prof. dr. sc. Boško Pribičević, prof. dr. sc. Damir Medak, Branko Kordić, dipl. ing., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, Zagreb.

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 takvoga 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 smještena Plitvička jezera. Najvažniji su vodotoci Crna i Bjela rijeka, koji postaju dijelom Plitvičkih jezera malo niže od mjesta njihova spajanja. One se susreću na središnjem dijelu nepropusnog pojasa, gdje nastaje najviše plitvičko jezero – Prošćansko, koje je predmet naših istraživanja.

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 nenarušenu prirodnu ravnotežu, prvi čimbenik zbog kojeg su Plitvička jezera postala dio Svjetske prirodne baštine.

Sedra se taloži na dnu Plitvičkih jezera u obliku mikroskopski sitnih kristalića koji dno jezera oblažu debelim slojem sprječavajući tako gubitak vode kroz rupičastu, kršku podlogu. Zahvaljujući tomu, velika Gornja jezera (Prošćansko 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 (zagađenja) 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, dno jezera prekriveno je podvodnim 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. Apсорpcija 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  $E$ :

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (1)$$

U morskoj vodi brzina zvučnog vala iznosi oko  $c = 1500$  m/s (uglavnom je između 1450 m/s i 1550 m/s, što ovisi o tlaku, salinitetu i temperaturi). Gustoća morske vode iznosi približno  $\rho = 1030$  kgm<sup>-3</sup>, dok je gustoća slatke vode nešto niža (1000 kgm<sup>-3</sup>).

U morskim sedimentima (talogu), koji se u prvom približenju smatraju tekućim medijem, gustoća varira između 1200 kgm<sup>-3</sup> i 2000 kgm<sup>-3</sup>. U zasićenim sedimentima brzina je proporcionalna brzini u vodi, pa brzina zvuka varira između 1500 m/s i 2000 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  $\mu$ s.

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:

$$\alpha = cT = \frac{c}{f}. \quad (2)$$

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.

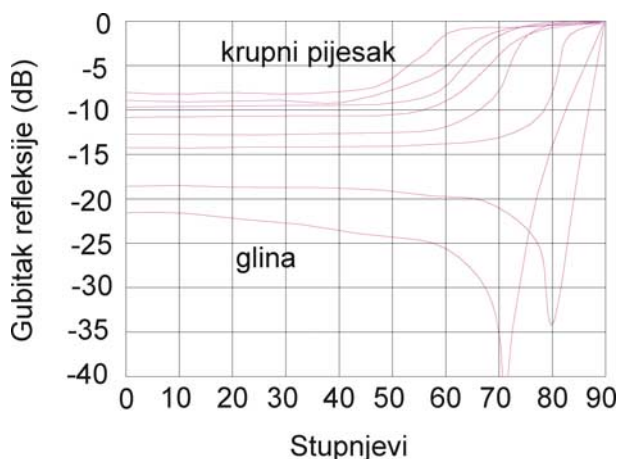
Procesi slični onima kod širenja vala u vodi (tj. unutarnja refrakcija i refleksija) mogu se javiti i unutar sedimenata. Sedimenti mogu isto tako pokazati profile brzine zvuka i gustoće s gradijentima i diskontinuitetom, zbog geoloških procesa u slojevima.

### 3.3 Refleksija

Zvučni će se val prilikom širenja kroz more ili jezero vrlo često sudariti sa zapreka 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 “odsječnog” 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 frekvencija 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.



Slika 1. Koeficijenti refleksije na površini vodenih pojedinih tipova sedimenata.

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 refrakcije kod seizmike (geologija, geofizika).

## 4. Snimanje Prošćanskog jezera i analiza mjerenja

### 4.1 Prošćansko jezero

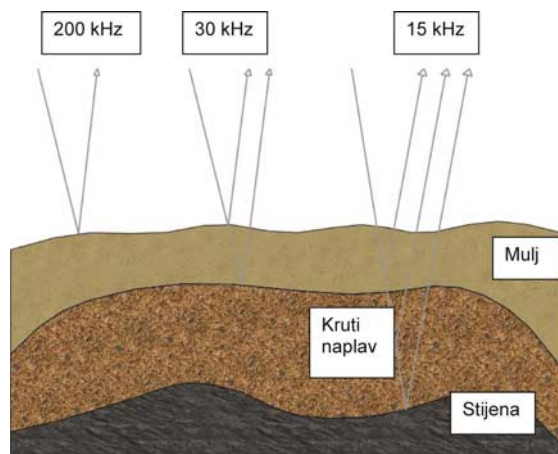
Prošćansko jezero, kao što je već spomenuto, ima najveću nadmorsku visinu u sustavu od 16 jezera. U jezero utječe stalni vodotok Matica, odnosno spojene vode Crne i Bijeje rijeke. Jezero se nalazi na nadmorskoj visini od 636 m, površina mu je 0,68 km<sup>2</sup>, a najveća dubina od 37 m ispred Osmanove 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 zabranjeno 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, odaslan 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 2).



Slika 2. Slojevi morskog dna.

### 4.3 Planiranje i priprema mjerenja

Kao priprema za izvođenje batimetrijskih mjerenja na Prošćanskom jezeru izvršena je vektorizacija granice jezera s karte TK Plitvice 22 mjerila 1:5000, korištenjem programskog paketa AutoCadMap. Granica jezera georeferencirana je i učitanu 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.

Tablica 1. Transformacijski parametri za područje NP Plitvice.

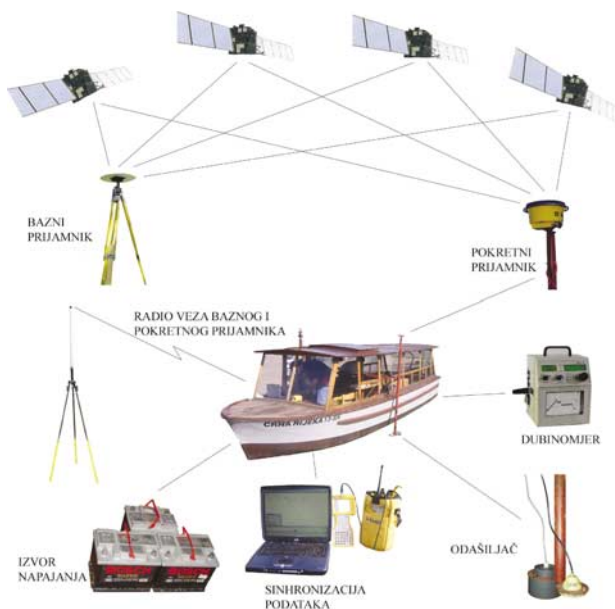
Parametar	Vrijednost
Rotacija po osi x	0° 00' 04,840951"
Rotacija po osi y	0° 00' 01,776092"
Rotacija po osi z	- 0° 00' 06,976504"
Translacija duž osi x	- 572,238 m
Translacija duž osi y	- 41,289 m
Translacija duž osi z	- 461,508 m
Faktor mjerila (ppm)	- 4,431

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 okolici 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 Prošćanskom 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



Slika 3. Kombinacija GPS-RTK mjerenja i dubinomjera.

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 Prošćanskom jezeru. Tijekom izvođenja mjerenja niskofrekventnom sondom uočeni su skokovi u dubini na relativno plitkom dijelu jezera. Stoga su izvedene i kose linije snimanja na kojima su izvedena ukupno 34 mjerenja s velikom (anomalnom) dubinom. Ta će mjerenja biti detaljnije analizirana u poglavlju 4.7.

#### 4.4.2 Obradba profila

Osim što omogućuje integraciju različitih mjernih sustava (u ovom slučaju dubinomjer i GPS), Hypack Max također omogućuje kvalitetnu obradbu i interpretaciju hidrografskih mjerenja. Programski paket Hypack Max sastoji se od više modula:

- modul za pripremu i prikupljanje podataka
- modul za editiranje i reduciranje podataka
- modul za generiranje finalnih produkata.

Provedenim batimetrijskim mjerenjima određeno je oko 39.000 točaka dna jezera s tri koordinate (dubina i položaj). Tijekom mjerenja Hypack Max kreira za svaki profil zasebnu datoteku. Naziv datoteke sastoji se od broja linije po kojoj se plovilo te vremena početka opažanja tog istog profila. Nakon obavljenih mjerenja program formira log-datoteke koje sadrže sva provedena mjerenja toga dana. Terenski mjereni podaci obrađuju se "filtriranjem". U tu svrhu koristi se modul *Single Beam Editor*, koji omogućuje editiranje svakog profila zasebno. Profili su prikazani numerički i grafički. Za svaku mjerenjem određenu točku može se vidjeti horizontalan i vertikalni položaj na profilu te pripadajuća dubina.

Nakon uređivanja koristi se modul *Statistics* kako bi se dobilo statističko izvješće i prikaz izmjerenog jezera s razlikama između profila na mjestima presijecanja, o čem će više riječi biti u poglavlju 4.6.

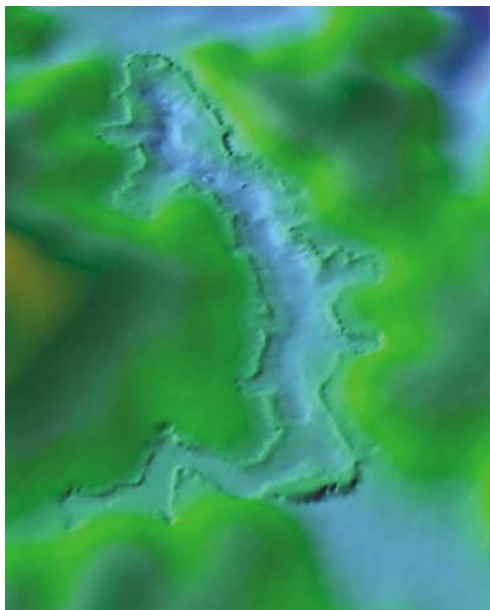
Na taj je način moguće ocijeniti koji je profil manje točnosti s obzirom na profile koje presijeca, a ako se pojave odstupanja, moguće je odrediti trend tih odstupanja. Ovisno o utvrđenim razlikama, profili se ponovno obrađuju u *Single Beam Editoru*, te se mjerenja obrađuju u statističkom modulu sve dok razlike ne budu u dopuštenim odstupanjima. Kod profila izmjerenih niskofrekventnom sondom, razlike mogu biti znatne s obzirom na narav niskofrekventnih mjerenja, te je njihovu obradbu potrebno izvoditi s velikim oprezom.

Sama su mjerenja točkasti podaci, i na njih najviše utječu dva faktora: metoda interpolacije i iskustvo. Prilikom filtriranja podataka, što je iterativni postupak, presudno je iskustvo za dobivanje realne slike reljefa dna.



#### 4.5 Izradba 3D modela Proščanskog jezera

Programski paket Golden Surfer omogućuje izradbu trodimenzionalnog prikaza Proščanskog jezera i okolnog terena (slika 4) 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 1:5000. Ta datoteka služi kao ulazna datoteka za stvaranje prostorne mreže (grida), tj. za postupak interpolacije kojom se dobiva gušća, pravilnija prostorna mreža koordinata, koja služi za tvorbu trodimenzionalnog modela.



Slika 4. Geodetski trodimenzionalni model Proščanskog jezera i okolnog terena.

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

U tablici 2 su prikazani karakteristični primjeri mjerenih dubina sondama visoke i niske frekvencije u različitim dijelovima jezera te također debljina nataložene sedre dobivena iz razlike mjerenih dubina. S obzirom na izmjerenu debljinu nataložene sedre, jezero možemo podijeliti na tri karakteristična dijela (slika 5). Prvi dio (A) karakteriziraju anomalno velike izmjerene vrijednosti koje su posebno

A

B

C

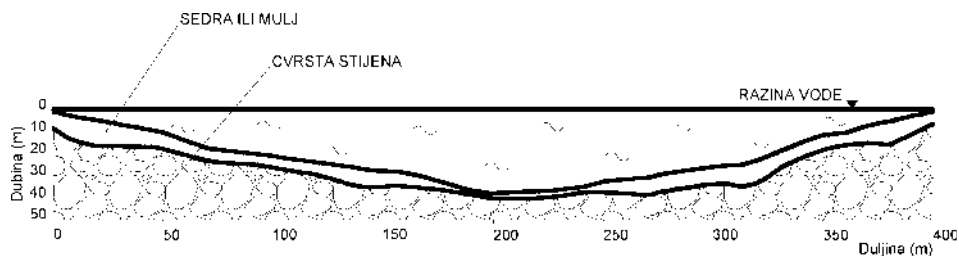
Slika 5. Proščansko jezero s prikazom točaka usporedbe dubina izmjerenih sondama visoke i niske frekvencije.

obrađene u poglavlju 4.7. Središnji dio Proščanskog jezera (B) ima najmanju debljinu nataložene sedre, a južni (gornji) dio jezera (C) ima najpravnomjernije vrijednosti debljine nataložene sedre u rasponu od 4,52 m do 11,71 m (vidi tablicu 2). Radi jasnijeg prikaza, na slici 6 je prikazan karakteristični uzdužni profil Proščanskog jezera.

Tablica 2. Dubine mjerene sondama visoke i niske frekvencije u različitim dijelovima jezera.

	Dubina 210 kHz (m)	Dubina 33 kHz (m)	Naslage sedre (m)
A	30,48	106,21	75,73
	32,96	61,12	28,16
	34,21	205,08	170,87
	32,15	256,23	224,08
	28,44	306,83	278,39
	27,68	475,40	447,72
	27,49	101,25	73,76
	5,09	7,42	2,33
	2,25	7,19	4,94
	2,39	7,45	5,06
	36,16	37,86	1,70
	27,17	29,82	2,65
	1,02	4,74	3,72
	18,57	19,46	0,89
	12,84	13,30	0,46
	15,02	17,01	1,99

	<b>Dubina 210 kHz (m)</b>	<b>Dubina 33 kHz (m)</b>	<b>Naslage sedre (m)</b>
B	10,87	15,22	4,35
	18,67	21,42	2,75
	20,15	20,89	0,74
	19,24	19,77	0,53
	21,12	21,54	0,42
	24,36	25,12	0,76
	22,15	22,66	0,51
	22,38	24,01	1,63
	23,76	25,61	1,85
	27,48	28,25	0,77
	31,27	33,26	1,99
	33,03	34,67	1,64
	2,98	13,22	10,24
	5,25	10,13	4,88
	4,94	7,23	2,29
	6,58	7,97	1,39
	3,48	5,07	1,59
	1,12	8,65	7,53
	4,14	9,75	5,61
	6,56	11,47	4,91
C	2,31	6,83	4,52
	4,68	9,34	4,66
	5,35	10,13	4,78
	5,89	11,42	5,53
	6,43	13,37	6,94
	7,86	15,01	7,15
	8,29	17,65	9,36
	9,92	19,73	9,81
	11,02	20,91	9,89
	12,31	22,12	9,81
	13,47	25,18	11,71
	11,41	22,41	11,00
	8,33	15,24	6,91
	7,17	15,61	8,44
	5,15	13,21	8,06

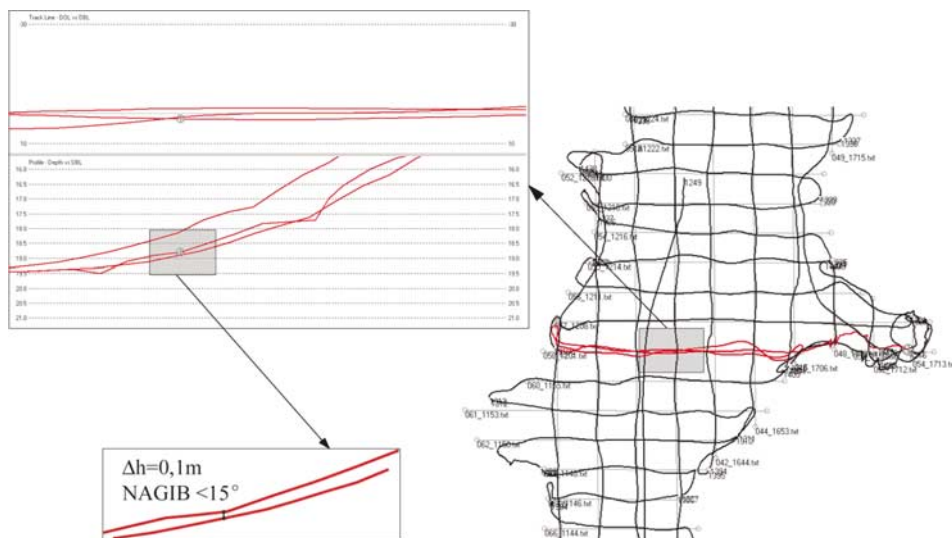


Slika 6. Uzdužni profil Prošćanskog jezera.

## 4.6 Analiza mjerenja i obradbe

### 4.6.1 Ispitivanje točnosti mjerenja dubina

Točnost mjerenja dubina ispitana je ponovljenim mjerenjem linija snimanja. Ponovljeni profili obrađeni su u modulu *Single Beam Editor*, koji se nalazi u okviru programskog paketa Hypack Max. Na presjeku ponovljenih profila utvrđene su razlike dubina (slika 7), te je određen približan nagib terena.

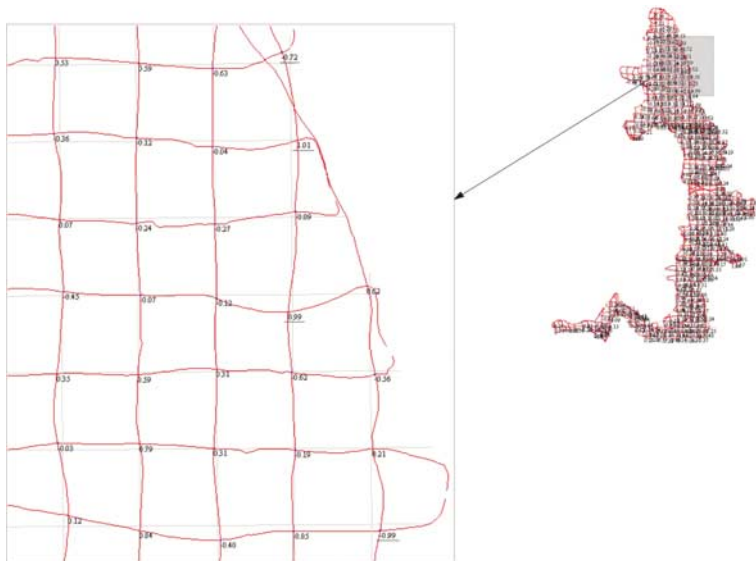


Slika 7. Razlika u dubini i nagib terena kod ponovljenih profila.

Na osnovi toga utvrđena je prosječna vanjska točnost mjerenja dubina oko 0,2 m, dok je točnost mjerenja dubina koju propisuje proizvođač 0,1 m. Mjerenja su izvođena u gotovo idealnim uvjetima. Razlike u dubinama nešto su veće uz rub jezera, a razlog nastajanja većih razlika bit će objašnjen u nastavku.

#### 4.6.2 Razlike u dubinama uz rub jezera

Nakon obradbe mjerenja u modulu *Statistics* utvrđeno je da se uz rubove jezera pojavljuju velike razlike u dubinama (slika 8).



Slika 8. Razlike u dubinama uz rubove jezera.

Razlog su tomu debla koja se nalaze u vodi (slika 9). Naime, Plitvička jezera su nacionalni park gdje je prirodni proces zaštićen od ljudskog djelovanja. Debla kroz dugo vremensko razdoblje padaju u vodu te uzrokuju pogrešno mjerenje dubine. Time je bitno narušena točnost mjerenja dubina. Iz statističke obradbe vidi se da su razlike u dubinama unutar jezera evidentno manje.

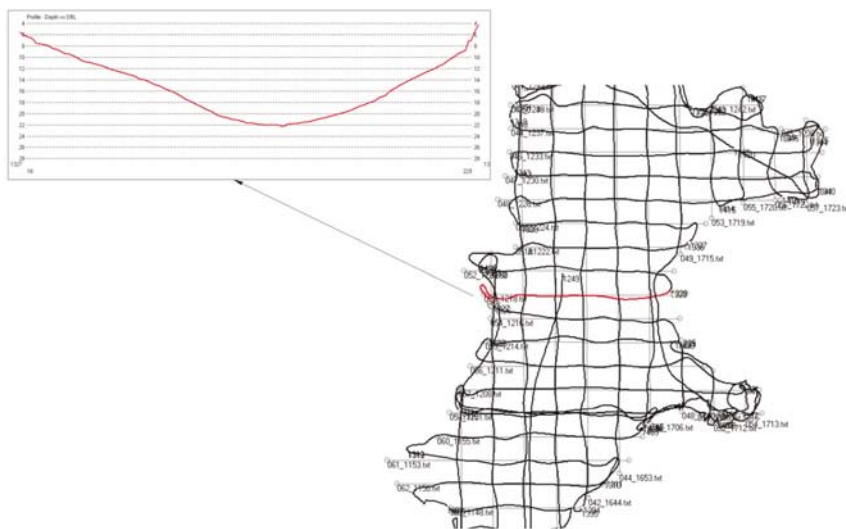


Slika 9. Debla u vodi.

Mjerenjem dubina s pomoću ultrazvučnog dubinomjera i obradom podataka mjerenja dobije se vrijednost dubina po profilima, a podatak između profila dobije se interpolacijom. To katkad ne odgovara stvarnoj, prirodnoj karakteristici dna. Kako bi se utvrdila stvarna karakteristika dna, potrebno je izvesti mjerenja bočnim (sidescan) sonarom, te na osnovi toga planirati mjerenje ultrazvučnim dubinomjerom. Stoga su mjerenja sonarom s bočnim motrenjem planirana u nastavku predmetnih istraživanja.

### 4.6.3 Određivanje karakteristike dna jezera

Karakteristiku dna moguće je odrediti na temelju gubitka refleksije (slika 1), kao i na temelju mjerenih profila, gdje do izražaja dolazi iskustvo opažača. Ako je profil "gladak" tada je dno prekriveno muljem ili u ovom slučaju sedrom (slika 10).

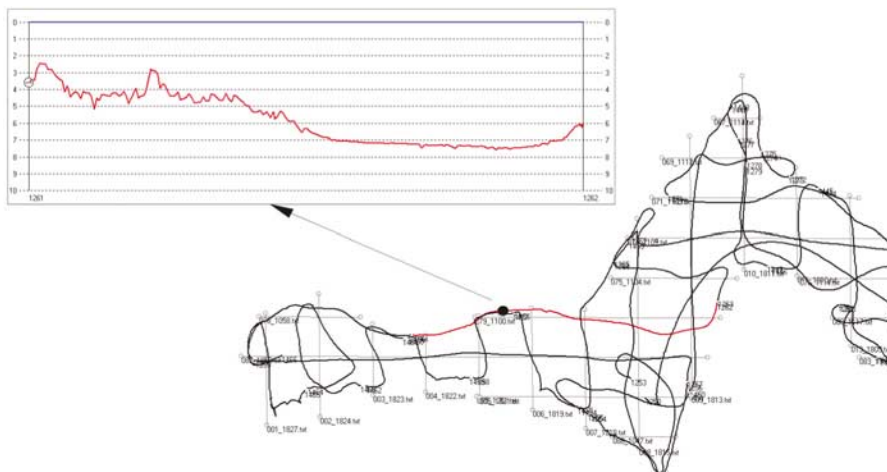


Slika 10. Grafički prikaz mjerenja nad dnom prekrivenim sedrom.

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).

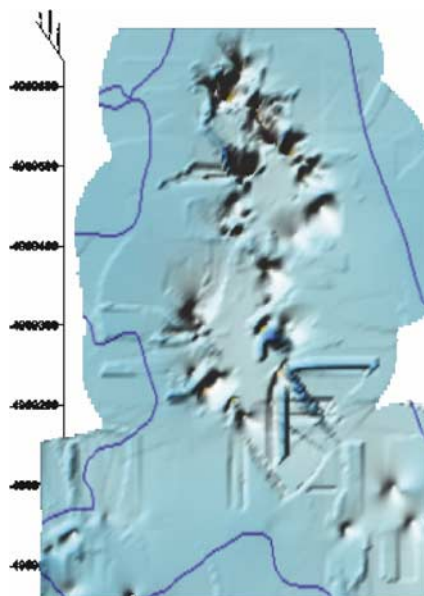
### 4.7 Analiza anomalija izmjerenih dubina

Prilikom obradbe rezultata mjerenja niskofrekventnom sondom uočeni su na dvije odvojene lokacije veliki skokovi dubina, s maksimalnom izmjerenom vrijednošću od čak 447,72 m (vidi tablicu 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.



Slika 11. Grafički prikaz mjerenja nad travnatim dnom.

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, te 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 Plitvič-



Slika 12. Položajni prikaz anomalija.



Slika 13. Karakteristični profil izmjerenih anomalnih dubina.

kih 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.

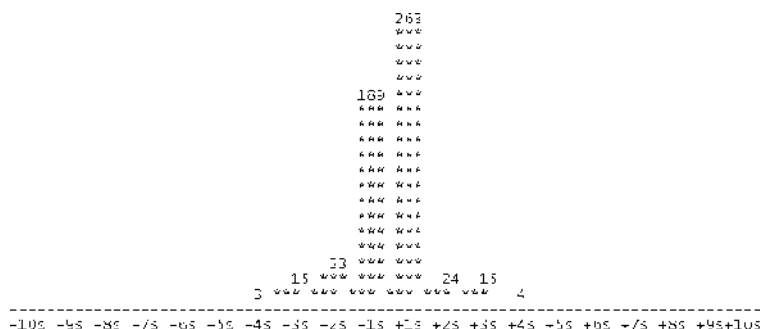
#### 4.8 Ocjena točnosti provedenih mjerenja

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- prijamnika.

Standardno odstupanje GPS-mjerenja sastoji se od horizontalne ( $\pm 1$  cm) i vertikalne ( $\pm 2$  cm) komponente, a standardno odstupanje mjerenih dubina iznosi  $\pm 2$  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 obrađenih 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 istraživačke 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 Prošćanskog jezera, 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 Prošćanskog jezera.

Analizom mjerenja na Prošćanskom jezeru 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.

Mjerenja na Prošćanskom jezeru pokazala su 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 je 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 (znanstveni projekt 0007018: Geodetsko-geodinamički GPS-projekti u Republici Hrvatskoj) i 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 / Sledzinski, Janusz (ed.)*. Warsaw : Warsaw University of Technology, 81–88.
- 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): *Program of Geodynamic and Environmental Studies in the Region of Plitvice Lakes // Reports of Geodesy No. 2 / Sledzinski, Janusz (ed.)*. Warsaw : 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.

## Application of Two-Frequencies Bathymetry in Determination of Travertine Layer

*ABSTRACT. The combination of echo-sounder with GPS was used for lake bottom exploration at the location Prošćansko jezero in Plitvice Lakes National Park. Two frequencies were used for bathymetric measurements: high frequency (210 kHz), which reflects from the bottom, and low frequency (33 kHz), which penetrates the upper travertine layer and reflects from the bottom bedrock. The methodology applied in this research yields the exact threedimensional position of the lake bottom including the thickness of travertine layer. The goal of this paper is to describe the application of the latest satellite and acoustic technology in threedimensional modeling of the Prošćansko lake bottom and in monitoring of travertine formation dynamics. Through the series of repeated measurements, this research, as the basis for other scientific disciplines, shall give the new insights about the prevention of eutrophication of Plitvice lakes.*

*Key words: two-frequencies bathymetry, threedimensional model, integration of satellite positioning and echosounder, eutrophication.*

*Prihvaćeno: 2007-03-02*