



Sveučilište u Zagrebu
**PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOGRAFSKI ODSJEK**

Ante Šiljeg

**DIGITALNI MODEL RELJEFA U ANALIZI
GEOMORFOMETRIJSKIH PARAMETARA
– PRIMJER PP VRANSKO JEZERO**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2013.



University of Zagreb

**FACULTY OF SCIENCE
DEPARTMENT OF GEOGRAPHY**

Ante Šiljeg

**DIGITAL TERRAIN MODEL IN THE
ANALYSIS OF GEOMORPHOMETRICAL
PARAMETERS – THE EXAMPLE OF
NATURE PARK LAKE VRANA**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2013



Sveučilište u Zagrebu
**PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOGRAFSKI ODSJEK**

Ante Šiljeg

**DIGITALNI MODEL RELJEFA U ANALIZI
GEOMORFOMETRIJSKIH PARAMETARA
– PRIMJER PP VRANSKO JEZERO**

DOKTORSKI RAD

Mentor: dr. sc. Sanja Lozić, doc.

Zagreb, 2013.



University of Zagreb

**FACULTY OF SCIENCE
DEPARTMENT OF GEOGRAPHY**

Ante Šiljeg

**DIGITAL TERRAIN MODEL IN THE
ANALYSIS OF GEOMORPHOMETRICAL
PARAMETERS – THE EXAMPLE OF
NATURE PARK LAKE VRANA**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Sanja Lozić, PhD, Assist. Prof.

Zagreb, 2013

Doktorski rad predložen Geografskom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu radi stjecanja akademskog stupnja doktora znanosti u području interdisciplinarnih znanosti, znanstveno polje geografija, znanstvena grana primijenjena geografija.

Ovaj doktorski rad izrađen je na Geografskom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u sklopu Poslijediplomskog dokorskog studija *Geografske osnove prostornog planiranja i uređenja*. Istraživanje je provedeno u okviru znanstvenog projekta *Hrvatski priobalni krški prostor – geomorfološke i ekološke značajke* 269-2693084-3083 (voditelj prof. dr. sc. Dražen Perica) provođenog uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
rad
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geografski odsjek

Doktorski

DIGITALNI MODEL RELJEFA U ANALIZI GEOMORFOMETRIJSKIH PARAMETARA – PRIMJER PP VRANSKO JEZERO

Ante Šiljeg

Jedan od najvažnijih zadataka geomorfometrije je izrada i analiza digitalnog modela reljefa. Upravo o digitalnom modelu reljefa, koji ima više specifičnih primjena, kao što su predviđanja, procjene rizika, donošenje odluka u upravljanju okolišem itd., ovise izlazni rezultati. Cilj istraživanja je, usporedbom 9 determinističkih i 8 geostatističkih metoda interpolacije, odabrati najprikladnije interpolatore za potrebe geomorfoloških istraživanja. Za izradu modela i usporedbu metoda interpolacije korištena su tri skupa visinskih podataka koji su dobiveni različitim metodama, tehnikama i procedurama prikupljanja podataka: batimetrijskom izmjerom, aerofotogrametrijskom izmjerom i stereorestitucijskom obradom i vektorizacijom izohipsi s HOK-a. Za odabir najboljih metoda interpolacije korišteno je 8 statističkih parametara, grafički prikazi (dvodimenzionalni i trodimenzionalni), izračun i usporedba profila i mjere strukture za odabrani geomorfometrijski parametar (nagib). Utvrđen je utjecaj vertikalne raščlanjenosti, gustoće uzoraka, veličine piksela, metoda interpolacije (tehnika), vertikalne rezolucije i algoritama na izlazne rezultate digitalnih analiza reljefa. Izrađena je prva batimetrijska karta Vranskog jezera u Republici Hrvatskoj na temelju batimetrijske izmjere pomoću RTK-GPS i jednosnopnog dubinomjera. Prikazani su novi znanstveno-metodološki utemeljeni podatci o batimetrijskim značajkama, površini i volumenu Vranskog jezera.

(187 stranica, 103 grafička priloga, 39 tablica, 288 bibliografskih referenci, 8 izvora podataka, 3 internetska izvora podataka; izvornik na hrvatskom jeziku)

Ključne riječi: digitalni model reljefa, determinističke i geostatističke metode interpolacije, geomorfometrijski parametri, GIS, metode prikupljanja podataka, prostorna rezolucija, Park prirode Vransko jezero

Mentor: dr. sc. Sanja Lozić, doc.

Povjerenstvo: dr. sc. Mladen Pahernik, doc., dr. sc. Danijel Orešić, izv. prof., dr. sc. Aleksandar Toskić, izv. prof., dr. sc. Nenad Buzjak, doc.

Rad prihvaćen: 4. lipnja 2013. godine

Rad je pohranjen u: Središnjoj geografskoj knjižnici na Geografskom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Marulićev trg 19/II, Zagreb i u Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu, Ulica Hrvatske bratske zajednice 4, Zagreb.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Geography

Doctoral Thesis

**DIGITAL TERRAIN MODEL IN THE ANALYSIS OF GEOMORPHOMETRICAL
PARAMETERS – THE EXAMPLE OF NATURE PARK LAKE VRANA**

Ante Šiljeg

One of the most important tasks of geomorphometry is the development and analysis of digital terrain models. The model - which can be used for various purposes, such as predictions, risk calculations, decision making in environmental management etc. – is the main factor which determines the quality of the output results. The aim of this research is to determine the optimal interpolators for the purpose of geomorphological researches, by the means of comparison of 9 deterministic and 8 geostatistical methods of interpolation. For the model development and interpolation method comparison, three sets of height data are used, which are acquired by various methods, techniques and procedures: bathymetric measurements, aerial survey (aerophotogrammetry), stereo-restitution analysis and vectorization of contour lines from the HOK database. For the selection of the best methods of interpolation, 8 statistical parameters and graphical representations (two-dimensional and three-dimensional) are used. The research aims to explain the effects of relief of the terrain, sample density, pixel size, methods (techniques) of interpolation, vertical resolution and algorithms in relation to the output results. The bathymetric map of Lake Vransko presented in this thesis is based on bathymetric surveys using RTK-GPS and singlebeam echosounder. It is also the first bathymetric map made using this methodology in Croatia. The new data on bathymetric features, surface and volume of Lake Vransko are presented in the thesis.

(187 pages, 103 figures, 39 tables, 288 references, 8 data sources, 3 internet sources; the original is in Croatian language)

Key words: digital terrain model, deterministic and geostatistical interpolation methods, geomorphometrical parameters, GIS, data gathering methods, spatial resolution, nature park Lake Vrana

Supervisor: Sanja Lozić, PhD, Assist. Prof.

Reviewers: Mladen Pahernik, PhD, Assist. Prof., Danijel Orešić, PhD, Assoc. Prof., Aleksandar Toskić, PhD, Assoc. Prof., Nenad Buzjak, PhD, Assist. Prof.

Thesis accepted: 4 June, 2013

Doctoral thesis is deposited in: Central Geographical Library, Faculty of Science, University of Zagreb, Marulićev trg 19/II, Zagreb, Croatia and in Nacional and University Library, Ulica Hrvatske bratske zajednice 4, Zagreb, Croatia.

ZAHVALA

Zahvaljujem svojoj mentorici i prijateljici doc. dr. sc. Sanji Lozić na usmjeravanju, savjetima, pomoći i podršci tijekom pisanja moje doktorske disertacije.

Zahvaljujem članovima povjerenstva za ocjenu i obranu doktorske disertacije prof. dr. sc. Danijelu Orešiću, prof. dr. sc. Aleksandru Toskiću i doc. dr. sc. Mladenu Paherniku na stručnim savjetima i susretljivosti.

Hvala i djelatnicima PP Vransko jezero na ustupljenim podacima bez kojih bi izrada ove disertacije bila otežana, te Geodetskom uredu Teodolit, posebno kolegi Marku Fabuliću na stručnim savjetima i ustupljenoj opremi kojom je izvršeno istraživanje.

Veliko hvala mojim profesorima, radnim kolegama i prijateljima prof. dr. sc. Martinu Glamuzini, prof. dr. sc. Draženu Perici, prof. dr. sc. Željki Šiljković, prof. dr. sc. Branku Cavriću na prenesenom znanju, potpori i poticaju mojem znanstvenom radu.

Hvala svim mojim dragim prijateljima na podršci i beskrajnom povjerenju, a posebno prijateljici Ivani Soče na objašnjenju svih matematičkih formula i pojmova.

Veliko hvala i mojim dragim roditeljima, bratu i sestri na potpori, podršci i vjeri u moj uspjeh.

Na kraju, najveće hvala mojim ljubavima, sinu Karlu i supruzi Silviji na svakom radosnom trenutku koji su mi pružili tijekom pisanja moje doktorske disertacije.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Ciljevi istraživanja	6
1.2. Temeljne hipoteze istraživanja	7
1.3. Pregled dosadašnjih istraživanja	7
2. TEORIJSKA OSNOVA	15
2.1. Digitalni model reljefa (<i>digital terrain model</i>)	15
2.2. Metode i tehnike prikupljanja podataka za izradu DMR	16
2.3. Osnovne strukture organizacije visinskih podataka	20
3. METODE ISTRAŽIVANJA	22
3.1. Interpolacija	22
3.1.1. Determinističke metode interpolacije	23
3.1.1.1. Triangulacijska nepravilna mreža (<i>triangulated irregular network</i>).....	23
3.1.1.2. Inverzna udaljenost (<i>inverse distance weighting</i>)	24
3.1.1.3. Prirodni susjed (<i>natural neighbor</i>)	26
3.1.1.4. Lokalna polinomna interpolacija (<i>local polynomial interpolation</i>)	27
3.1.1.5. Radijalne osnovne funkcije (<i>radial basis functions</i>)	29
3.1.1.6. ANUDEM (<i>Australian National University DEM</i>) ili <i>Topo to raster</i>	30
3.1.2. Geostatističke metode interpolacije	31
3.1.2.1. Kriging.....	32
3.1.2.2. Kokriging (<i>cokriging</i>).....	39
3.2. Određeni interpolacijski programi i moduli	40
3.3. Metode usporedbe i procjene kvalitete interpolacijskih metoda	41
3.4. Metode određivanja veličine ćelije (piksela) DMR	43
3.5. Metode batimetrijskog istraživanja	45
3.6. Metode vektorizacije	46
3.7. Izrada DMR-a	46
4. BATIMETRIJSKO ISTRAŽIVANJE	47
4.1. Metode i tehnike batimetrijske izmjere	48
4.1.1. Jednosnopni dubinomjeri.....	48
4.1.2. Višesnopni dubinomjeri.....	49
4.1.3. Zračni laserski dubinomjeri	50
4.2. Princip rada dubinomjera	51
4.3. Plan batimetrijske izmjere	52

4.3.1. Područje premjera.....	53
4.3.2. Svrha premjera.....	54
4.3.3. Korištena oprema.....	55
4.3.3.1. Dubinomjer <i>Hydrostar 4300</i>	57
4.3.3.2. Bazni GPS <i>Z-Max Thales</i>	59
4.3.3.3. Kalibracija sustava za prikupljanje podataka	59
4.4. Vremenski rok.....	60
4.5. Sekundarni podatci.....	61
4.6. Obrada batimetrijskih podataka	62
4.6.1. Interpolacija podataka prikupljenih batimetrijskom izmjerom	63
4.6.2. Predikcijski grafovi.....	73
4.6.3. Površina i volumen jezera.....	74
5. IZRADA DMR IZ PODATAKA DOBIVENIH VEKTORIZACIJOM IZOHIPSI.....	83
5.1. Točnost HOK-a	83
5.2. Vektorizacija izohipsi	84
5.3. Interpolacija izohipsi.....	85
5.4. Usporedba DMR dobivenih iz različitih skupova visinskih podataka	87
6. IZRADA DMR IZ PODATAKA PRIKUPLJENIH FOTOGRAMETRIJOM.....	88
6.1. Interpolacija aerofotogrametrijski prikupljenih podataka.....	90
6.2. Metoda podijeljenih uzoraka i <i>jackknifing</i>.....	100
6.3. Usporedba metoda interpolacije kroz prostorne prikaze	102
6.4. Odabir prostorne rezolucije	115
7. DIGITALNE ANALIZE RELJEFA.....	120
7.1. Geomorfološki parametri.....	121
7.1.1. Morfometrijski parametri	122
7.1.1.1. Vertikalna raščlanjenost	122
7.1.1.2. Nagib	125
7.1.1.2.1. Mjere krajobrazne strukture.....	129
7.1.1.2.2. Primjena mjera krajobrazne strukture u analizi nagiba padina.....	135
7.1.1.3. Ekspozicija.....	137
7.1.1.4. Zakrivljenost padina	139
8. RASPRAVA I ZAKLJUČAK.....	147
LITERATURA I IZVORI.....	165
ŽIVOTOPIS.....	185
POPIS RADOVA.....	186

1. UVOD

Reljefni oblici na Zemljinoj površini su iznimno kompleksni zbog čega ih većina znanstvenika proučava kroz izradu i analizu digitalnog modela reljefa (DMR odnosno DTM, *digital terrain model*) (Dikau i dr., 1995; Bishop i Shroder, 2000; Millaresis i Argialas, 2000; Wilson i Gallant, 2000; Tucker i dr., 2001; Shary i dr. 2002; Chaplot i dr., 2006; Wilson, 2011). Model je objekt ili koncept, odnosno pojednostavljena stvarnost (apstrakcija) pretvorena u oblik koji možemo razumjeti (Meyer, 1985; Wu i Marceau, 2002). On može imati više specifičnih primjena, kao što su istraživanja, predviđanja, procjene rizika, donošenje odluka u upravljanju okolišem itd. (Schloeder i dr., 2001; Hijmans i dr. 2005; Dobesch i dr., 2007; Li i Heap, 2008). DMR ima široku primjenu u različitim znanstvenim disciplinama kao što su geomorfologija, hidrologija, klimatologija, krajobrazna ekologija, geologija, kartografija itd. Ovisno o primjeni, model treba biti izrađen na način da zadovolji svrhu za koju je napravljen, iz razloga što navedene znanstvene discipline zahtijevaju različite razine točnosti.

Od sredine 20. stoljeća razvile su se različite tehnike izrade i analize digitalnog modela reljefa zahvaljujući rapidnom razvoju računalne tehnologije, matematike i računalne grafike (Pike, 1995; Pike, 2000). Digitalni model reljefa je, najjednostavnije rečeno, statistički prikaz kontinuiranih površina reljefa (u vektorskom ili rasterskom obliku) s nizom poznatih x , y i z koordinata unutar proizvoljno odabranog koordinatnog sustava (Miller i Laflamme, 1958). U literaturi ne postoji usuglašena terminologija oko nazivlja. Tako se, ovisno o znanstvenoj disciplini ili državi, koriste sljedeći nazivi: 1) digitalni model terena (reljefa) (*digital terrain model*), 2) digitalni elevacijski model (*digital elevation model*), 3) digitalni model visina (*digital height model*), 4) digitalni osnovni model (*digital ground model*), 5) digitalni model visina reljefa (*digital terrain elevation model*) i 6) digitalni model površina (*digital surface model*). U Hrvatskoj se najčešće koristi termin digitalni model reljefa, preferiran od geografa i geodeta. Često se navedeni termini u literaturi smatraju istoznačnicama, a zapravo se značajno razlikuju. Kod korištenja termina treba biti iznimno oprezan, jer odabrani termin ovisi prije svega o metodama prikupljanja visinskih podataka i odabiru istih kod kreiranja modela. Visinski podatci s x , y koordinatama i z vrijednostima mogu predstavljati različite oblike ili objekte na Zemljinoj površini (automobile, stabla, dalekovode itd.).

U radu je, generalno, za cijelo područje PP Vransko jezero korišten naziv digitalni model reljefa, koji je nastao interpolacijom visinskih podataka prikupljenih batimetrijskom i aerofotogrametrijskom izmjerom. Digitalni model reljefa je pojednostavljeni prikaz reljefa u

rasterskom obliku, specifične rezolucije, dobiven odabranom i znanstveno utemeljenom metodom interpolacije podataka o visinama, prikupljenih specifičnom izmjerom i obradom.

Danas su, bez obzira na rapidni razvoj tehnologije, većina prikupljenih (izmjenjenih) podataka točkasti uzorci, dakle imaju točnu vrijednost odabrane varijable samo na izmjerenim x, y koordinatama. Da bi se dobile kontinuirane površine koje su neophodne za proučavanje, a time i poznavanje prostora u kojem živimo, potrebno je procijeniti vrijednosti na neuzorkovanim područjima koristeći pritom različite metode interpolacije (Collins i Bolstad, 1996; Hartkamp i dr., 1999; Hu i dr., 2004; Naoum i dr., 2004). Također, danas su znanstvenicima dostupne različite metode i tehnike interpolacije. One se razlikuju prema korištenim algoritmima, koji mogu biti jednostavni ili izrazito kompleksni. Postoji nekoliko kriterija odabira metode interpolacije: primjenjivost u prostoru i vremenu, mogućnost točne kvantifikacije interpoliranih vrijednosti, mogućnost uključivanja pomoćnih informacija, složenost zahtjeva, razina potrebnog znanja, vremenska dužina geoprocesiranja, ograničenost metoda i tehnika prikupljanja podataka, veličina skupa podataka (broja točaka), dostupnost i kompleksnost korištenih softvera, itd. (Knotters i dr., 2010). Treba naglasiti da ne postoji najbolja metoda interpolacije jer su sve metode uvjetovane prostorno-vremenskom komponentom. To znači da je rezultat usporedbe i odabira najbolje metode interpolacije trenutno i ovisi o vremenu u kojem živimo i tehnologiji koju koristimo za prikupljanje i obradu podataka.

Krajnji rezultat primjene metoda interpolacije su modeli koji aproksimiraju ili pojednostavljaju Zemljinu površinu. Svaka metoda daje različiti prikaz, stoga je glavni izazov generirati najtočniju moguću površinu na temelju uzoraka, te utvrditi karakter pogrešaka i varijabilnosti procijenjenih vrijednosti testiranjem i usporedbom različitih metoda interpolacije.

U radu su najprikladnije metode interpolacije odabrane na temelju 8 statističkih parametara: minimalna vrijednost, maksimalna vrijednost, doseg, zbroj vrijednosti, srednja vrijednost, varijanca i standardna devijacija. Od statističkih parametara treba izdvojiti parametar standardne devijacije ili srednje kvadratne pogreške. Ona je u svijetu najkorištenija mjera za ocjenjivanje točnosti digitalnih modela (Yang i Hodler, 2000; Aguilar i dr., 2005). Osim analize parametara, interpolacijske metode su uspoređene na temelju vjerodostojnih dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih grafičkih prikaza skupa podataka. Korištene su i metode usporedbe volumena jezera primjenom različitih algoritama, metode izračuna i usporedbi profila (Pribičević i dr., 2007; Medved i dr., 2010) kao i metode krajobrazne metrike (mjere strukture) za odabrani geomorfometrijski parametar (nagib).

Za usporedbu točnosti metoda interpolacije korištena je metoda unakrsnog vrednovanja (*cross-validation*). Većina autora predlaže unakrsno vrednovanje za ocjenu točnosti određene metode interpolacije (Cressie, 1993; Smith i dr., 2003; Webster i Oliver, 2007; Hofierka i dr., 2007). Osim metode unakrsnog vrednovanja korištene su još dvije metode (podijeljenih uzoraka i *jackknifing*) ocjenjivanja dosljednosti interpolacijskog algoritma.

Za izradu digitalnih modela reljefa i njihovu međusobnu usporedbu analizirano je 9 determinističkih: triangulacijska nepravilna mreža (*triangulated irregular network* – TIN), prirodni susjed (*natural neighbor* – NaN), ANUDEM ili *topo to raster*, inverzna udaljenost (*inverse distance weighting* – IDW), lokalna polinomna funkcija (*local polynomial* – LP), radijalna osnovna funkcija – tankoslojni splajn (*radial basis function* (ROF) – *thin-plate spline* – TPS), ROF – splajn s tenzijom (*spline with tension* – SWT), ROF – potpuno regulirani splajn (*completely regularized spline* – CRS), ROF – multikvadratna (*multiquadric* – MQ) i ROF – inverzna multikvadratna (*inverse multiquadric* – IMQ) i 8 geostatističkih metoda interpolacije: obični kriging (*ordinary kriging* – OK), jednostavni kriging (*simple kriging* – SK), univerzalni kriging (*universal kriging* – UK), disjunktivni kriging (*disjunctive kriging* – DK), obični kokriging (*ordinary cokriging* – OCK), jednostavni kokriging (*simple cokriging* – SCK), univerzalni kokriging (*universal cokriging* – UCK), disjunktivni kokriging (*disjunctive cokriging* – DCK)).

Kvaliteta izrađenog modela ovisi o metodama, tehnikama i procesima prikupljanja, obrade i analize podataka, vertikalnoj raščlanjenosti reljefa određenog područja, prostornoj (horizontalnoj) rezoluciji i korištenim metodama interpolacije. Metode prikupljanja podataka za izradu DMR-a mogu se usporediti na temelju četiri kriterija: 1) cijena, 2) točnost, 3) gustoća uzoraka i 4) zahtjevnost obrade prikupljenih podataka (Hengel i dr., 2003). Kvaliteta DMR-a ovisi o točnosti visina u pikselu (apsolutna točnost) i točnosti predstavljanja morfologije (relativna točnost). Postoji 5 metoda prikupljanja podataka za izradu digitalnog modela reljefa: 1) terenska izmjera, 2) fotogrametrijsko prikupljanje podataka, 3) lasersko snimanje (skeniranje), 4) radarsko prikupljanje podataka i 5) metoda vektorizacije s postojećih topografskih karata.

Kao ulazni podatci za izradu modela i usporedbu metoda interpolacije korištena su tri skupa visinskih podataka koji su dobiveni različitim metodama, tehnikama i procedurama prikupljanja podataka: 1) batimetrijskom izmjerom, 2) aerofotogrametrijskom izmjerom i stereorestitucijskom obradom i 3) vektorizacijom izohipsi s HOK-a. Osnovno pravilo kod prikupljanja podataka je da se izmjerom prikupe reprezentativne točke reljefa na temelju kojih

će se izraditi model koji će aproksimirati stvarnu površinu. Ovisno o tome je li zaravnjen, brežuljkast ili brdovit, reljef će diktirati metodu prikupljanja.

Visinski podatci se najčešće organiziraju u tri osnovne strukture koje se koriste za predstavljanje površina u digitalnom obliku: 1) pravilna mreža (rešetka ili matrica), 2) TIN (triangulacijska nepravilna mreža, i 3) izohipse.

Postoje različiti programi i moduli koji se koriste za interpolaciju izmjerenih podataka u svrhu izrade pravilne kvadratne mreže koja služi za analizu i vizualizaciju (Legendre i Legendre, 1988; Robertson, 2000; Pebesma, 2004; Yang i dr., 2004; Hengel, 2007). Za interpolaciju, analizu i interpretaciju izmjerenih podataka korišten je alat *Geostatistical Analyst*. On omogućuje primjenu dviju skupina interpolacijskih tehnika: 1) determinističkih i 2) stohastičkih.

S obzirom na važnost prostorne rezolucije (veličine piksela), kod kreiranja modela objašnjeno je i testirano više metoda za izračun veličine piksela: kartografsko pravilo (*cartographic rule*), kontrola gustoće (*inspection density*), analiza gustoće točaka (*point pattern analysis*) i kompleksnost reljefa (*complexity of terrain*) (McCullagh, 1988; Hengel, 2006).

Metode interpolacije i izrađeni modeli uspoređeni su kroz digitalnu analizu reljefa odnosno odabrane morfometrijske parametre da bi se utvrdila primjenjivost modela u geomorfološkim istraživanjima.

1.1. Ciljevi istraživanja

Ciljevi ove doktorske disertacije su sljedeći:

- Odrediti batimetrijske značajke, površinu i volumen Vranskog jezera.
- Analizom odabranih geomorfometrijskih parametara ispitati kvalitetu DMR-a za potrebe geomorfoloških istraživanja.
- Ispitati visinske pogreške DMR-a.
- Izraditi i usporediti digitalne modele reljefa.
- Odrediti najprikladnije metode interpolacije za izradu rasterskih modela.
- Odrediti najprikladniju prostornu rezoluciju za izrađene modele.

1.2. Temeljne hipoteze istraživanja

Temeljne hipoteze ove disertacije su sljedeće:

- Niskom frekvencijom dubinomjera utvrdit će se debljina i obujam sedimenata.
- Geostatističke metode prikladnije su za interpolaciju u svrhu izrade DMR-a od determinističkih metoda.
- Točnost stohastičkih metoda ovisi o odabiru kriterija prilikom izrade semivariograma.
- Smanjenje odstupanja (*nugget*) negativno utječe na aproksimaciju i procjenu u područjima u kojima nisu vršena mjerenja.
- Veća vertikalna raščlanjenost reljefa negativno utječe na točnost interpolacijskih algoritama.
- Vizualna analiza grafičkih prikaza (dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih) utječe na odabir metode interpolacije.
- Primjenom mjera krajobrazne analize moguće je usporediti pet najboljih metoda interpolacije.

1.3. Pregled dosadašnjih istraživanja

Potrebno je spomenuti nekoliko važnijih radova povezanih s teoretskom i praktičnom primjenom različitih metoda koje se koriste u procesu izrade i analize digitalnog modela reljefa. Navedeni su kronološkim redoslijedom.

Mitas i Mitsova (1999) su raspravljali o problemima, mogućnostima, odnosima, razlikama i primjenama interpolacijskih metoda u različitim znanstvenim disciplinama. Svojstva interpolacijskih metoda egzaktno su ilustrirali dvodimenzionalnim i trodimenzionalnim prikazima. Uputili su na interpolacijske alate dostupne u GIS aplikacijama, te ukazali na zahtjeve koje trebaju ispuniti.

Sties i dr. (2000) su usporedili dvije tehnike za prikupljanje visinskih podataka: zračni laser i interferometrički sintetski radar, na površini od 200 km² (područje južne Njemačke). Istaknuli su preciznost tehnika u prikupljanju podataka te mogućnost njihove primjene na različitim razinama upravljanja i u različitim oblastima. Koristili su tri različite metode usporedbe dobivenih podataka kojima su došli do sličnih rezultata. Obje metode prikupljanja visinskih

podataka pokazale su dobre rezultate na područjima bez vegetacije ili na područjima koja su prekrivena niskom vegetacijom (visinska razlika do 0,5 m). Veće visinske razlike između tehnika prikupljanja zabilježene su na područjima sa značajnijom vegetacijom i na naseljenim područjima.

Wilson i Gallant (2000) raspravljaju o digitalnim analizama reljefa ističući važnost digitalnog modela reljefa. Navode da je fotogrametrija najraširenija metoda prikupljanja visinskih podataka te da se isti grupiraju u tri strukture podataka (vektor, raster i izohipse). Navode popis primarnih i sekundarnih reljefnih parametara koji se mogu izvesti iz DMR-a i njihovo značenje u različitim znanstvenim disciplinama. Usporedili su dvije metode interpolacije, TIN i ANUDEM, i način na koji parametri utječu na izlazne rezultate digitalne analize reljefa.

Johnston i dr. (2001) dali su detaljne upute kako koristiti *Geostatistical Analyst* (naprednu ekstenziju *ArcGIS-a*) za modeliranje površina, koristeći geostatističke i determinističke metode interpolacije. Kroz različite grafičke priloge, definicije i primjere ponudili su konceptualne informacije kako riješiti geostatističke zadatke. Prikazali su principe rada softvera i ekstenzije koja sadrži čitav niz jedinstvenih, jednostavnih i naprednih alata. Ekstenzija uključuje tri ključna koraka: 1) prostorno istraživačke analize podataka, 2) strukturne analize, 3) procjenu rezultata i predviđanje površina.

Thompson i dr. (2001) su istraživali i istaknuli važnost prostorne (horizontalne rezolucije) i vertikalne preciznosti za točnost digitalnog modela reljefa u svrhu istraživanja značajki tala. Cilj rada bio je usporediti *grid* modele različite horizontalne rezolucije (od 10 do 30 m), reprezentirane s različitom vertikalnom preciznošću (od 0,1 do 1 m). Dobiveni modeli su uspoređeni kroz geomorfometrijske analize nagiba, zakrivljenosti i porječja.

Jong i dr. (2002) prezentirali su osnove hidrogeografije i dali pregled širokog područja primjene. Knjiga se sastoji od 11 poglavlja koja su međusobno povezana, međutim mogu se proučavati i odvojeno. U radu su najviše korištena poglavlja 6 (Podvodna akustika) i 11 (Metode snimanja dubina).

Gousie i Franklin (2003) predstavili su tehniku izrade DMR-a temeljenu na rasterskim izohipsama. Metoda izračunava novu srednju izohipsu koja se nalazi između postojećih, na način da se pronalazi najkraći segment linije koja spaja točke dviju susjednih izohipsi različitih visina. Nova izohipsa se koristi kao podatak sukcesivne iteracije, dok se ne formira inicijalna površina.

Hengel i dr. (2003) su uveli novi pojam digitalne analize reljefa koji podrazumijeva skup tehnika za izvođenje reljefnih parametara iz DMR-a. Objasnili su navedeni teoretski koncept,

proces modeliranja podataka i reljefne parametre. U zadnjem poglavlju knjige dali su korisnički vodič za rad u programu ILWIS na konkretnom primjeru baranjskog pobjrđa.

Smith i dr. (2003) interpretirali su 4 metode interpolacije na temelju pogrešaka u digitalnom modelu površina. Model je dobiven iz visinskih podataka prikupljenih laserskim skeniranjem. Koristili su dvije metode usporedbe metoda interpolacije: metodu unakrsnog vrednovanja i *jackknifing*. Autori su demonstrirali važnost razumijevanja prostorne strukture grešaka i naveli su primjere uzroka pojedinih grešaka.

Grohman (2004) je ukazao na važnost razvoja i interpretacije morfometrijskih karata u geomorfološkim studijama. Istakao je ulogu GIS-a u analizi geomorfometrijskih parametara, zbog brzine i preciznosti procesiranja podataka. Pomoću *open source* programa GRASS i R proveo je analize s ciljem naglaska prepoznavanja istih i njihove perspektive u znanstvenim istraživanjima.

Hengel i dr. (2004) sistematiziraju metode za nadogradnju mogućnosti minimaliziranja artefakata i grubih pogrešaka u analizi reljefnih parametara. Koriste tri pristupa reduciranja pogrešaka u digitalnom modelu reljefa i izvedenim reljefnim parametrima. Metode su testirane na zaravnjenom i brežuljkastom reljefu.

Kienzle (2004) istražuje utjecaj i važnost prostorne rezolucije (veličine piksela) kao elemenata DMR-a na izvođenje primarnih (nagib, ekspozicija), sekundarnih (profilna i planarna zakrivljenost) i kombiniranih (indeks vlažnosti) geomorfometrijskih parametara. Kao ulazne podatke za izradu DMR-a koristio je visinske točke prikupljene aerofotogrametrijskom izmjerom i stereorestitucijskom obradom. Testirana su 4 područja različite gustoće uzorkovanja visinskih podataka i vertikalne raščlanjenosti. Veličine piksela su se kretale od 5 do 100 metara. Za interpolaciju visinskih podataka koristio je ANUDEM metodu interpolacije, a za pronalazak optimalne rezolucije koristio je tri pristupa: analizu gustoće visinskih točaka, analizu frekvencije distribucije (Kolmogorov-Smirnov test) i srednju kvadratnu pogrešku.

Kilvington (2004) je napisao priručnik za praktična hidrografska istraživanja koji pruža detaljne smjernice koje treba uzeti u obzir prilikom planiranja, izvođenja i upravljanja hidrografskim istraživanjima.

Naoum i dr. (2004) rangiraju prostorne interpolacijske tehnike korištenjem GIS sustava za donošenje odluka (*decision support system ili DSS*). Podloga DSS je *ArcGIS* i programski jezik *AVENUE*. Uspoređuju 5 determinističkih i jednu geostatističku metodu interpolacije.

Peralvo (2004) raspravlja o značajkama metoda interpolacije u izradi DMR za hidrološke analize. Koristio je 4 različite metode: inverznu udaljenost, radijalne osnovne funkcije,

TOPOGRID i obični kriging. Iz dobivenih modela izradio je mrežu tokova pomoću alata *Arc Hydro*, koja je kasnije poslužila za usporedbu metoda interpolacije. Dokazao je da je TOPOGRID najbolja metoda interpolacije za izradu hidrološki točnih modela.

Yang i dr. (2004) su usporedili 12 različitih metoda interpolacije integriranih u softver *SURFER* 8.0. U radu su dali kratak opis za svih 12 metoda ističući njihove prednosti i nedostatke. Područje istraživanja je vertikalno raščlanjenije, ukupne površine 215 km². Kao statističke parametre usporedbe metoda interpolacije koristili su: vrijeme procesiranja, minimalne, maksimalne i srednje vrijednosti pogreške te standardnu devijaciju. Uz statističke parametre, koristili su metodu prikaza reljefa sjenčanjem i metodu histograma.

Aguilar i dr. (2005) su istražili utjecaj morfologije terena, gustoću uzorkovanja i utjecaj interpolacijskih metoda na kvalitetu digitalnog modela reljefa. Glavni ciljevi istraživanja bili su procjena točnosti visina DMR-a i odnos između standardne devijacije i vertikalne raščlanjenosti. Testirali su 7 determinističkih metoda interpolacije. Kao najbolja metoda prema zadanim parametrima pokazala se radijalna osnovna funkcija – multikvadratna.

Bohling (2005), u priručniku za geostatistiku i analizu variograma, objasnio je pojam geostatistike i njene važnosti u znanstvenim disciplinama. Navodi komponente geostatistike te primjere za prostorno istraživačke metode, kovarijancu, semivariogram i korelaciju. Definirao je osnovne komponente kreiranja semivariograma: odstupanje, prag, doseg, udaljenost, teorijski model, odmak i broj odmak. Istakao je važnost i razlike između izotropije i anizotropije.

Hyyppa i dr. (2005) u radu analiziraju lasersku metodu prikupljanja podataka, odnosno utjecaj datuma (vremenskog roka), visine leta, pulsa, nagiba reljefa i šumskog pokrova na točnost digitalnog modela površina. Uspoređuju podatke za tri godine (1998, 2000 i 2003), s tim da su podatci snimani u različitim godišnjim dobima.

IHO (2005) predstavlja tim stručnjaka iz više zemalja članica *Međunarodne hidrografske organizacije*, koji su objavili *Priručnik o hidrografiji*. Cilj priručnika je pružiti korisniku opsežna znanja o konceptima koji su uključeni u hidrografiju, kao i smjernice za planiranje i izvršenje hidrografskih istraživanja. Priručnik je profesionalni vodič za istraživače, ali i alat za nastavnike i studente koji su uključeni u hidrografske tečajeve. Glavni ciljevi Priručnika su: 1) koordinacija aktivnosti nacionalnih hidrografskih ureda, 2) veća ujednačenost na pomorskim kartama i dokumentima, 3) kreiranje pouzdanih i učinkovitih metoda hidrografskih istraživanja i 4) razvoj znanstvenog pristupa u području hidrografije. Sadržaj priručnika je podijeljen u 7 poglavlja: 1) načela hidrografske izmjere, uključujući specifikacije, 2) pozicioniranje, 3) metode i tehnike utvrđivanja dubina, 4) klasifikacija i

detekcija morskog dna, 5) vodostaj i protok, 6) topografske izmjere u hidrografiji i 7) pojedinosti o hidrografskoj praksi.

Chaplot i dr. (2006) izradili su studiju točnosti interpolacijskih tehnika za generiranje digitalnog modela reljefa na primjeru odnosa tipova reljefnih oblika i kvalitete i gustoće prikupljenih podataka. Istražili su različite reljefne oblike (od mikro oblika do porječja) za 6 područja različitih površina: tri u planinskim područjima sjevernog Laosa i tri u zapadnoj Francuskoj. Gustoća točaka u istraživanim područjima kretala se od 4 do 10 točaka na km². Koristili su 3 determinističke (IDW, RST, MQ – RBF) i dvije geostatističke (OK, UK) metode interpolacije. Najbolje rezultate pokazala je deterministička metoda interpolacije multikvadratna ROF-a.

Hengel (2006) raspravlja o empirijskim i analitičkim pravilima odabira optimalne veličine piksela za karte temeljene na inherentnim svojstvima ulaznih podataka. Naglašava da je prostorna rezolucija u odnosu s kartografskim pravilima i statističkim konceptima. Demonstrirao je odabir prostorne rezolucije korištenjem 4 skupa podataka. Za svaku od 7 metoda odabira veličine piksela preporučio je tri kategorije: gruba, fina i optimalna rezolucija, koja je kompromis između grube i fine.

Gjuranić (2007) je prikazao jednu od metoda proračuna triangulacije s teorijskom podlogom i nekoliko primjera korištenja. Također je naveo nekoliko primjera uporabe Voronoijevog dijagrama i metoda proračuna.

Hengel (2007) je izradio praktičan priručnik za geostatističko kartiranje varijabli okoliša. Glavni cilj priručnika je pomoći korisniku pri upotrebi geostatističkih alata i objasniti osnovne korake u izradi kvalitetnih karata korištenjem operativnih alata implementiranih u 4 *open-source* softvera: *ILWIS*, *R+gstat*, *SAGA GIS* i *Google Earth*. U radu ističe nedostatke korištenja *open-source* softvera zbog ograničene podrške u pojašnjenjima osnovnih pojmova. Knjiga je podijeljena u 4 poglavlja: 1) uvod u praktično geostatističko kartiranje i pregled prostornih predikcijskih tehnika, 2) karakteristike regresijskog kriginga (prednosti i nedostaci), 3) upute za instalaciju i osnovni koraci za rad u navedenim softverima i 4) vodič za analize i generiranje izlaznih rezultata.

Pahernik (2007) analizira morfometrijska obilježja padina otoka Raba. Na temelju formiranoga DMR-a izrađeni su rasterski slojevi vrijednosti nagiba, ekspozicije i zakrivljenosti padina, te dolinska mreža koja je grupirana prema Strahlerovoj metodi. Prostorni raspored vrijednosti pojedinih morfometrijskih parametara doveden je u vezu sa strukturnim i morfogenetskim obilježjima otoka Raba.

Pribičević i dr. (2007) daju prikaz primjene najsuvremenijih satelitskih i akustičkih hidrografskih mjerenja potrebnih za izradu digitalnog trodimenzionalnog modela dna Prošćanskog jezera i praćenje dinamike taloženja sedrenih naslaga. Jezero je snimano primjenom dvofrekventne batimetrije, odnosno dvjema sondama: sondom visoke frekvencije (210 kHz), te sondom niske frekvencije (33 kHz).

Webster i Oliver (2007) detaljno su opisali geostatističke postupke i metode koje se mogu primjenjivati u različitim znanstvenim područjima. Istaknuli su važnost geostatistike i detaljno objasnili većinu geostatističkih pojmova. Ponudili su veliki broj praktičnih primjera za načine odabira i korištenja geostatističke tehnike u pojedinim znanstvenim disciplinama.

Andričević i dr. (2008) predstavljaju kompilaciju različitih materijala iz područja geostatistike i stohastičkog modeliranja. Osnovni cilj knjige je upoznati korisnika s osnovnim metodama i modelima, te kako na temelju praktičnih primjera vršiti procjenu i interpolaciju.

Bihn i Thuy (2008) istaknuli su važnost DMR-a kao važne komponente GIS aplikacija u različitim socio-ekonomskim oblastima, posebice u upravljanju prirodnim resursima, procjeni rizika i podršci u odlučivanju. Za izradu DMR-a koristili su tri popularne interpolacijske tehnike: inverznu udaljenost, splajn i kriging na četiri različita područja. Glavni cilj rada bio je ispitivanje utjecaja interpolacijskih tehnika na točnost DMR-a. Dokazali su da je za područja s većom vertikalnom raščlanjenosti najbolja splajn metoda, dok su inverzna udaljenost i kriging pokazali zadovoljavajuće rezultate.

Li i Heap (2008) daju smjernice i sugestije u vezi primjene interpolacijskih metoda. Uspoređuju i proučavaju značajke više od 40 metoda interpolacije koje su podijelili u tri kategorije: ne geostatistički, geostatistički i kombinirani interpolatori. Na kraju su naveli popis najrelevantnijih softvera u koje su integrirane metode interpolacija.

Malvić (2008) je objavio priručnik sa svrhom da studente osposobi za čitanje i izradu dubinskih geoloških karata i razumijevanje i interpretaciju oblika koji su prikazani na tim kartama. Objasnio je vrste prikaza i izolinija koje se upotrebljavaju, odnosno parametara koje je smisljeno kartirati. Ukratko je opisao 4 interpolacijske metode, s posebnim naglaskom na kriging metodu.

Medak i dr. (2008) su ispitivali geostatističku metodu univerzalnog kriginga kojom se iz izmjerenih podataka uklanja trend. Istraživanje je uključilo ispitivanje utjecaja *a priori* određenih standardnih odstupanja u točkama mjerenja na *a posteriori* standardno odstupanje interpoliranih točaka.

Erdogan (2009) uspoređuje determinističke i geostatističke metode interpolacije za izradu digitalnog modela reljefa. Cilj rada bio je ispitati visinske pogreške DMR-a. Visinske točke za

izradu modela su prikupljene terenskom izmjerom pomoću nivelmana. Dobiveni modeli su uspoređeni kroz dva morfometrijska parametra: nagib i zakrivljenost padina. Najbolje rezultate pokazala je metoda ROF – tankoslojni splajn.

Pike i dr. (2009) definiraju geomorfometriju i njene ciljeve. Navode da geomorfometrijska analiza podrazumjeva nekoliko koraka: uzorkovanje podataka o visinama, izradu modela, izvođenje parametara iz DMR-a i primjenu izlaznih rezultata.

Pohjola i dr. (2009) su izradili digitalni model reljefa visoke rezolucije (2,5*2,5 metara) za područje Olkiluoto, površine 960 km². Testirali su više metoda interpolacije, a kao najbolja metoda pokazala se deterministička metoda tankoslojni splajn. Aspekt vjerojatnoće modela postignut je preko Monte Carlo simulacije u tri faze. Za izradu modela koristili su dva skupa visinskih podataka: izohipse i nepravilno izmjerene podatke.

Soycan i Soycan (2009) su vektorizirali izohipse na topografskim kartama u mjerilu 1:1000 i koristili ih kao ulazne visinske podatke za izradu DMR-a. Cilj rada bio je ispitati točnost izrađenog modela za potrebe urbanog planiranja, inženjerskih istraživanja, itd. Za interpolaciju su koristili radijalnu osnovnu funkciju tankoslojni splajn.

Beutel i dr. (2010) su prezentirali izradu DMR-a visoke rezolucije s 150 milijuna piksela. Za interpolaciju visinskih podataka prikupljenih laserskom tehnologijom koristili su determinističku metodu interpolacije prirodni susjed (*natural neighbour*). U radu su istaknuli važnost GPU (*graphic processing unit*) za brzinu procesiranja.

Knotters i dr. (2010) daju kratak pregled determinističkih i geostatističkih metoda interpolacije. Opisuju primjenu interpolacijskih tehnika na temelju dvije studije: 1) vremenska interpolacija kao pokazatelj kvalitete vode i 2) prostorno vremenska interpolacija na primjeru koncentracije pesticida u nizozemskim površinskim vodama. Kroz ove primjere pomažu znanstvenicima da odaberu optimalne interpolacijske tehnike.

Lin i dr. (2010) su vrednovali utjecaj prostorne rezolucije DMR-a na SWAT predviđanja, odnosno trošenje sedimenata i hranjivih tvari (fosfor i dušik). DMR su izradili na temelju visinskih podataka prikupljenih različitim metodama i tehnikama (DLG5, ASTER30 i SRTM90). Testirali su 11 prostornih rezolucija od 5 do 140 metara.

Medved i dr. (2010) koristili su podatke iz dvije serije mjerenja koja su poslužila za praćenje količine iskopanih mineralnih sirovina na dnu Prošćanskog jezera. Na temelju kvalitetnih i visoko preciznih podataka izmjere stvoren je trodimenzionalni model dna jezera. U procesu interpolacije koristili su više različitih metoda nakon čega su uspoređene dobivene razlike. Na primjeru izračuna volumena prikazani su rezultati različitih algoritamskih rješenja.

Rodriguez i Suarez (2010) uspoređuju matematičke algoritme za utvrđivanje nagiba u GIS okruženju. Ističu važnost primjene nagiba u različitim znanstvenim disciplinama. Algoritme uspoređuju na digitalnom modelu reljefa rezolucije 10 metara. Koriste dva programa, *ArcGIS* 9.2 i *SEXTANTE*. Rezultati su pokazali da je Zevenbergen i Thorne algoritam najprikladniji za izračun nagiba iz korištenog DMR-a.

Rusu i Rusu (2010) ističu važnost metoda interpolacije u praćenju stanja okoliša i dokazuju prednost korištenja radijalnih osnovnih funkcija u odnosu na geostatističke metode. Mišljenja su da je neopravdano geostatističke metode smatrati prikladnijima. Naglasili su da ne postoji najbolja metoda interpolacije. Dali su detaljan pregled prednosti i nedostataka determinističkih i geostatističkih metoda interpolacije.

Mohamed i dr. (2011) u radu su istražili utjecaj metoda interpolacije na točnost DMR-a. Istaknuli su faktore koji utječu na kvalitetu DMR-a: metode uzorkovanja visinskih podataka, gustoća podataka, kompleksnost reljefa, interpolacijske metode i zadani parametri. Koristili su tri skupa visinskih podataka i tri metode interpolacije: prirodni susjed, inverznu udaljenost i obični kriging.

Willson (2011) je dao pregled metoda i izvora podataka za izradu DMR-a i izvođenje reljefnih parametara koji su se primjenjivali u posljednjih 25 godina. Opisao je koliko su nove metode (LiDAR i RADAR) utjecale na promjene u načinu prikupljanja visinskih podataka. Raspravlja i o novim izazovima i trenutnim metodama procesiranja DMR-a. Temeljni cilj rada je izvođenje primarnih parametara direktno iz DMR-a i dva skupa sekundarnih parametara kombinacijom više modeliranih varijabli.

S obzirom na kompleksnost i sveobuhvatnost usporedbi metoda interpolacije većina znanstvenika, koja proučava metode interpolacije za potrebe izrade DMR-a, u svojim radovima prednost daje statističkim parametrima. Od statističkih parametara treba izdvojiti parametar standardne devijacije ili srednje kvadratne pogreške. Ona je u svijetu najkorištenija mjera za ocjenjivanje točnosti digitalnih modela. Često se u znanstvenim radovima zanemaruje vizualna metoda, na čiju važnost ukazuju Mitas i Mitasova (1999; 2007). Dvodimenzionalni i trodimenzionalni grafički prikazi, za razliku od statističkih pokazatelja, jasno prikazuju nedostatke pojedinih metoda interpolacije u prikazu kontinuiranih površina jer se mogu uočiti nelogičnosti u modelu koje nastaju kao produkt interpolacijske funkcije između izmjerenih točaka.

2. TEORIJSKA OSNOVA

2.1. Digitalni model reljefa (*digital terrain model*)

Od sredine 20. stoljeća razvile su se različite tehnike digitalnog prikazivanja i analiziranja reljefa zahvaljujući rapidnom razvoju računalne tehnologije, matematike i računalne grafike (Pike, 1995; Pike 2000). Digitalni modeli reljefa mogu biti prikazani grafički i matematički. Npr. polinomi su uobičajeni matematički prikazi, dok su pravilna ili nepravilna mreža (*grid*), prikaz izohipsama i različiti dijagrami grafički prikazi. U predstavljanju reljefa, digitalni model reljefa je jedan od najvažnijih pojmova (Li i dr., 2005).

Digitalni model reljefa je, najjednostavnije rečeno, statistički prikaz kontinuiranih površina reljefa (u vektorskom ili rasterskom obliku) s nizom poznatih x, y i z koordinata unutar proizvoljno odabranog koordinatnog sustava (Millner i Laflamme, 1958). U literaturi ne postoji usuglašena terminologija oko nazivlja. Tako se, ovisno o znanstvenoj disciplini ili državi, koriste sljedeći nazivi: 1) digitalni model terena (*digital terrain model*) – najstariji pojam koji su odredili Millner i Laflamme (1958). Ovaj koncept, koji osim reljefa uključuje i druge opće geografske objekte, odnosi se na dio terena koji ima određene značajke (Li i dr., 2005). Međutim, pojam terena se različito tumači, ovisno o znanstvenoj disciplini. Npr. geodeti proučavaju digitalni model terena iz perspektive prikaza terena s posebnim naglaskom na topografiju terena i objekata na njemu, 2) digitalni elevacijski (visinski) model (*digital elevation model*) – naglasak je stavljen na visine od određene referentne plohe; najviše se koristi u Sjevernoj Americi, 3) digitalni model visina (*digital height model*) – ima široku primjenu u Njemačkoj, 4) digitalni osnovni model (*digital ground model*) – naglasak je na digitalnom modelu „čvrstog“ dijela površine Zemlje; koristi se najviše u Velikoj Britaniji, 5) digitalni model visina reljefa (*digital terrain elevation model*) – ima široku primjenu u SAD; uveden je i korišten od strane USGS i DMA, 6) digitalni model površina (*digital surface model*) – najnoviji termin koji se počeo koristiti razvojem tehnologije laserskog prikupljanja podataka.

U Hrvatskoj se najčešće koristi termin digitalni model reljefa, preferiran od geografa i geodeta. U većini hrvatskih znanstvenih radova DMR se odnosi na model koji je nastao interpolacijom izohipsi s osnovnih karata 1:5000 i topografskih karata 1:25000, gdje izohipse predstavljaju reljef, odnosno čvrsti dio Zemljine površine. U dokumentu DGU iz 2003, *Specifikacija proizvoda digitalni model reljefa*, pojam DMR koristi se za zbroj pojedinačnih markantnih točaka, rastera visinskih točaka, prijelomnica i linija oblika potrebnih za prikaz

Zemljine površine. Pod pojmom digitalni model visina podrazumijeva se mreža visina (visinskih točaka) interpoliranih na osnovu DMR-a.

Često se gore navedeni termini u literaturi smatraju istoznačnicama, a zapravo se značajno razlikuju. Kod korištenja termina treba biti iznimno oprezan, jer odabrani termin ovisi prije svega o metodama prikupljanja visinskih podataka i odabiru istih kod kreiranja modela. Visinski podatci s x, y koordinatama i z vrijednostima mogu predstavljati različite oblike ili objekte na Zemljinoj površini (automobile, stabla, dalekovode itd.). U ovom slučaju korištenje termina DMR nije opravdano jer npr. dalekovodi nisu dio reljefa. Stoga autor treba znati koje visinske podatke (i iz kojeg razloga) uključuje u izradu modela, te sukladno tome odabrati najprimjereniji naziv.

Iz navedenog se može zaključiti da je termin digitalni elevacijski model najgeneralniji i možda najbolji za upotrebu, jer stvara najmanje konfuzije kod čitatelja. On se odnosi na visinske podatke koji mogu predstavljati bilo kakvu pojavu ili objekt u prostoru. Nakon odabira specifičnih visinskih podataka npr. visina za dalekovode, autor se može odlučiti za precizniji (tematski) naziv – npr. digitalni model dalekovoda.

U radu se generalno za cijelo područje PP Vransko jezero preferira naziv digitalni model reljefa koji je nastao interpolacijom visinskih podataka prikupljenih batimetrijskom i aerofotogrametrijskom izmjerom. Digitalni model reljefa je pojednostavljeni prikaz dijela reljefa u rasterskom obliku, specifične rezolucije, dobiven odabranom (znanstveno utemeljenom) metodom interpolacije podataka o visinama prikupljenih specifičnom batimetrijskom i fotogrametrijskom izmjerom i obradom.



2.2. Metode i tehnike prikupljanja podataka za izradu DMR-a

Glavno pravilo kod prikupljanja podataka je da se izmjerom prikupe reprezentativne točke reljefa na temelju kojih će se izraditi model koji će aproksimirati stvarnu površinu. Ovisno o tome je li zaravnjen, brežuljkast ili brdovit, reljef će diktirati metodu prikupljanja. Metode prikupljanja podataka za izradu DMR-a mogu se usporediti prema četiri kriterija (Hengel i dr., 2003): 1) cijena, 2) točnost, 3) gustoća uzoraka i 4) zahtjevnost obrade prikupljenih podataka. Tradicionalno su se visinski podatci prikupljali terenskim istraživanjem ili poluautomatskom digitalizacijom, korištenjem steroplota. Ovo je točna, ali ujedno i najsporija i najskuplja metoda prikupljanja podatka (Hengel i dr., 2003). Kvaliteta DMR-a je mjera točnosti visina u pikselu (apsolutna točnost) i točnosti predstavljanja morfologije (relativna točnost).

Postoji 5 metoda prikupljanja podataka za izradu digitalnog modela reljefa: 1) terenska izmjera, 2) fotogrametrijsko prikupljanje podataka, 3) lasersko snimanje (skeniranje), 4) radarsko prikupljanje podataka i 5) metoda vektorizacije s postojećih topografskih karata.

1) Terenska izmjera

Podaci prikupljeni direktnom terenskom izmjerom su najtočniji (Karamustafić, 2007; Lasić, 2007). Vrijeme prikupljanja i točnost podataka ovise o korištenim geodetskim instrumentima: GPS, totalna satnica teodolit, tahimetar, nivelir i terestričko lasersko snimanje (Karamustafić, 2007; Lasić, 2007). Terestričko lasersko snimanje (TLS) relativno je nova tehnologija mjerenja (pojavi se tek krajem devedesetih godina dvadesetog stoljeća) koja se, uz tradicionalne metode u geodeziji, koristi kao metoda dobivanja koordinata određenih točaka u 3D prostoru (Lasić, 2007; Mechelke i dr., 2007). Kod TLS metode instrumenti odašilju niz laserskih impulsa kako bi izmjerili udaljenosti i horizontalne i vertikalne kutove pojedinih točaka u prostoru (Slika 1). Iako je proces laserskog skeniranja u potpunosti automatiziran, naknadna obrada podataka znatno je zahtjevnija, dugotrajnija i kompleksnija od obrade klasičnih terenskih mjerenja (Golek i dr., 2012). Laserski skeneri se razlikuju po preciznosti mjerenja na različitim udaljenostima, vremenu koje je potrebno za prikupljanje detaljnih točaka, intenzitetu povratnog signala odbijenog od različitog materijala objekta snimanja i sposobnosti modeliranja jednostavnog ili složenog geometrijskog oblika objekta (Adami i dr., 2007). S obzirom na karakteristike, ova metoda se koristi većinom za lokalne projekte koji uključuju manja područja.

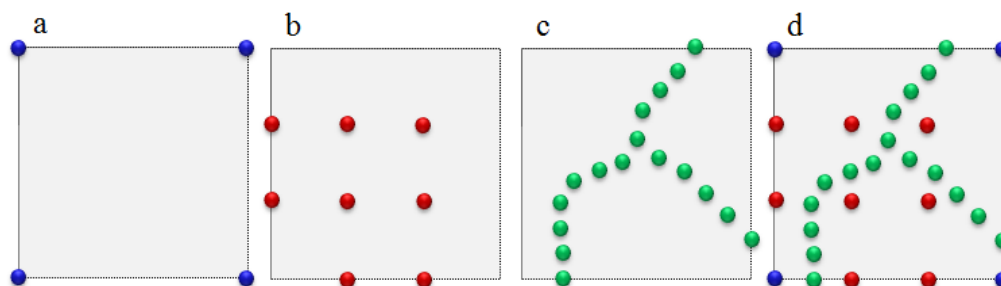
Klasična mjerna stanica	Terestrički laserski skener
<ul style="list-style-type: none"> ✚ mjerenje karakterističnih točaka ✚ mnogo truda za malo točaka ✚ uloženi trud po točki je velik ✚ geometrija snimljenih točaka je deskriptivna ✚ točke snimanja odabiru se na terenu (iskustvo) ✚ odabir snimljenih točaka određuje kvalitetu snimka 	<ul style="list-style-type: none"> ✚ pojedinačna mjerenja ✚ ne mjere se karakteristične točke ✚ nekontroliran odabir točaka ✚ snimka nema geometrijskog značenja (simbolika) ✚ uloženi trud po točki je mali ✚ odabir snimljenih točaka u uredu (<i>postprocessing</i>) ✚ kvaliteta je opisnog karaktera – ovisi o snimljenim elementima
	

Sl. 1. Usporedba klasične mjerne stanice s TLS-a (preuzeto iz: Miler i dr., 2007)

2) Fotogrametrijsko prikupljanje podataka

Fotogrametrija je znanstvena disciplina i tehnologija dobivanja pouzdanih kvantitativnih informacija o objektima na Zemlji, procesom snimanja, označavanja, mjerenja, analiziranja i interpretacije fotografskih snimaka i prikaza elektromagnetskog zračenja dobivenih senzorskim sustavima (Govorčin i dr., 2012; Mitrović i dr., 2012). Osnovni zadatak fotogrametrije je dobivanje x, y, z koordinata pomoću stereorestitucije, koristeći pritom prikladnu opremu (ručni ili analitički stereploter). Stereorestitucija podrazumijeva prikupljanje podataka o visinama iz prethodno orijentiranih parova snimaka (rješavanje osnovnog zadatka fotogrametrije) (Mitrović i dr., 2012). Prema položaju kamere u prostoru, fotogrametrija može biti terestička, aero i orbitalna. Najširu primjenu ima aerofotogrametrija – kamere se pričvršćuju na posebna žiroskopski stabilizirana postolja iznad otvora na podu zrakoplova. Ovu metodu karakterizira velika gustoća prikupljanja podataka. Gustoća prikupljanja se prilagođava konkretnom projektu i morfološkim osobinama terena. Ova metoda zahtijeva manje terenskog rada, pokriva velika područja, pogodna je za mjerenja u opasnim i nepristupačnim područjima i primjenjuje se u različitim oblastima (Huggel i dr., 2003; 2008). Najveći problem kod ove metode predstavlja vegetacija i optička vidljivost terena sa snimališta (mora biti dobra). Točnost visinskih podataka aerosnimaka kreće se od 10 centimetara do 1 metra, dok je kod satelitskih snimaka znatno manja (10 do 20 metara, npr. ASTER) (Huggel i dr., 2003; 2008).

Raspored točaka prilikom prikupljanja i obrade podataka može biti pravilan ili nepravilan (Slika 2).



Sl. 2. Metode uzorkovanja visinskih podataka

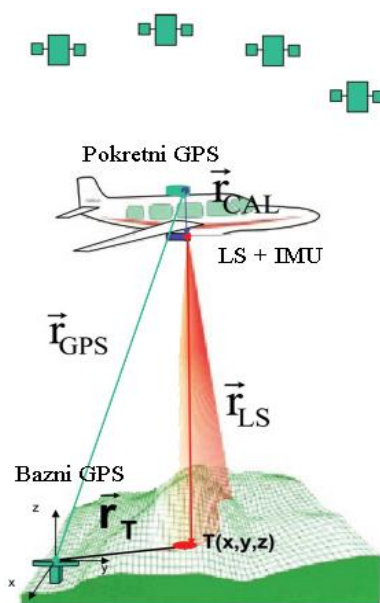
a) *regular sampling*, b) *progressive sampling*, c) *selective sampling* i d) *composite sampling*

Uz pravilan raspored točaka (*regular sampling*) vezane su mnoge prednosti, međutim pitanje je kako odrediti optimalan razmak između visinskih točaka. Ako se razmak između točaka podesi prema reljefu s izrazitijim visinskim promjenama, na zaravnjenom reljefu bit

će više točaka nego što je potrebno (Weibel i Heller, 1991). Taj nedostatak može se otkloniti promjenjivom gustoćom točaka (*progressive sampling*) (Makarović, 1977; Frančula, 2004). Međutim, ni s promjenjivom gustoćom točaka ne može se vjerno opisati reljef, zbog čega su potrebne dodatne karakteristične točke i linije (*selective sampling*) (Frančula, 2004). Na kraju, dolazi se do zaključka da najbolje rezultate daje kombinacija pravilne i trokutne (nepravilne) mreže (*composite sampling*) (Makarović, 1977; 1979; Weibel i Heller, 1991). U konačnici su prikupljene točke koje najbolje reprezentiraju morfološki karakter terena: točke na linijama loma terena i naglih promjena nagiba, točke duž linija najvećih zakrivljenosti, vrhovi, udoline i sedla, točke raspoređene u pravilnom rasteru i ostale proizvoljno raspoređene točke.

3) Lasersko snimanje (skeniranje)

Lasersko snimanje je potpuno automatizirana i izuzetno efikasna metoda prikupljanja prostornih podataka koja se afirmirala posljednjih desetak godina (Wehr i Lohr, 1999; Gajski, 2007). Ova tehnologija, koja se uobičajeno označava pojmom LiDAR (*Light Detection and Ranging*) ima široku primjenu u različitim oblastima: geodezija, geologija, biologija, arheologija itd. (Sangam, 2012). Lasersko skeniranje može biti aero (koje se češće koristi) i terestričko (Miler i dr., 2007; Holopainen i dr., 2010). Udaljenost od senzora (postoji više vrsta) do mjerene točke određuje se na osnovu mjerenja vremena (RTK-GPS) koje je potrebno da laserski impuls stigne do objekta i reflektira se nazad (Gajski, 2007) (Slika 3). Metodu karakterizira izrazito velika gustoća i brzina prikupljenih točaka (od 10000 do 100000



u sekundi) (Reutebuch i dr., 2005). Radi efikasnije klasifikacije i filtriranja podataka potrebno je grupirati podatke prema geometrijskim karakteristikama objekata na koje se odnose. Zadatak filtriranja je izdvajanje korisnih od neželjenih informacija, a klasifikacijom se korisne informacije razvrstavaju u razrede (klase) (Gajski, 2007). Stoga se već za vrijeme skeniranja bilježi prijemni signal, digitaliziran u vremenskoj domeni, što omogućava provođenje tzv. *first pulse – last pulse* klasifikacije.

Sl. 3. Lasersko prikupljanje podataka (preuzeto iz: Gajski, 2007)

Najveći problem metode je prorjeđivanje podataka, jer količina podataka nadilazi kapacitet uobičajene hardverske i softverske opreme (Basa i Juraj, 2011). Točnost izmjerenih podataka je centimetarska i ovisi prvenstveno o GPS opremi, frekvenciji i visini letenja (Kujundžić, 2007). Osim čvrstog dijela Zemljine površine model može uključivati sve što se nalazi na površini, kao što su vegetacija, živi svijet, infrastruktura i sl.

4) Radarsko prikupljanje podataka

Metoda koja koristi dvije ili više sintetičkih antena za generiranje visina. Vrijednosti visina dobivaju se kao rezultat razlika između emitirane i povratne elektromagnetske energije od satelita ili aviona do određenog objekta na Zemljinoj površini. Predstavlja jedinstvenu metodu prikupljanja podataka čija preciznost može biti milimetarska (Richards, 2007). Ima važnu ulogu i široku primjenu u proučavanju tektonskih procesa, glaciologiji, praćenju slijeganja zemljišta, potresa, vulkanskoj aktivnosti itd. (Berens, 2006).

5) Metoda vektorizacije s postojećih topografskih karata

Dugotrajan proces koji zahtijeva skeniranje analognih karata, georeferenciranje, vektorizaciju izohipsi i pridruživanje atributa (visina). Od svih navedenih metoda ova je geodetski najmanje točna.

2.3. Osnovne strukture organizacije visinskih podataka

Visinski podatci se najčešće organiziraju u tri osnovne strukture koje se koriste za predstavljanje površina u digitalnom obliku (Slika 4): 1) pravilna mreža (rešetka ili matrica), 2) TIN (triangulacijska nepravilna mreža i 3) izohipse.

Pravilna mreža (rešetka ili matrica)

Rasterski model podataka je pojednostavljeni prikaz reljefa pomoću piksela i određen je prostornom rezolucijom i veličinom rastera (broj redaka i stupaca). Proteklih desetljeća najkorištenija je struktura zbog svoje jednostavnosti (Wilson i Gallant, 2000). Karakterizira je više opcija za rad s ploham (kontinuiranim objektima) od vektorskih, kao i mogućnost optimalnijeg modeliranja. Većina digitalnih analiza reljefa, upravo zbog navedenih karakteristika, temelji se na rasterskoj strukturi podataka.

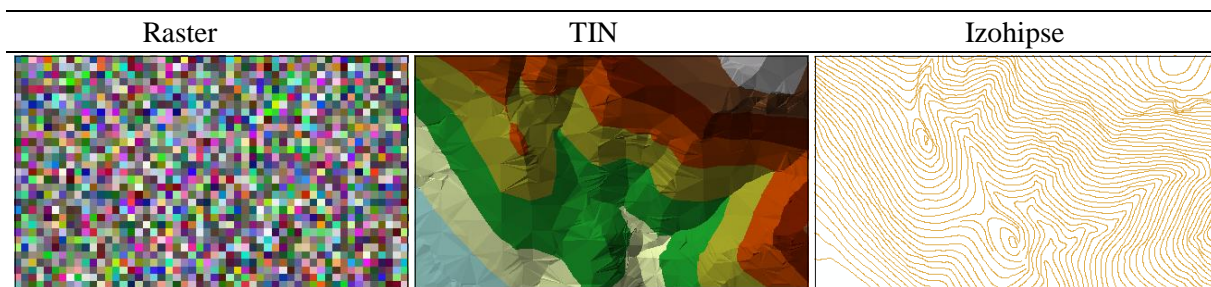
Ova metoda ima i određene nedostatke: 1) podatkovna veličina mreže – najčešće je zahtjevna za pohranu (bez obzira na razvoj tehnologije u smislu komprimiranja i brzine geoprocesiranja podataka), 2) računalna učinkovitost – odnosi se u prvom redu na vremensko trajanje procesa geoprocesiranja različitih reljefnih parametara, 3) kvaliteta izlaznih podataka – mrežom se teško mogu prikazati nagle promjene visine i često se zanemaruju važni detalji reljefa (Zevenbergen i Thorne 1987; Moore i dr., 1991, Weibel i Heller, 1991; Willson i Gallant, 2000). Danas su za različite dijelove Zemlje dostupni digitalni modeli reljefa različite veličine pravilne mreže (piksela): 500, 100, 30, 10, 1 metar.

TIN (triangulacijska nepravilna mreža)

Vektorski model podataka je pojednostavljeni prikaz reljefa pomoću točaka, linija i poligona. Mreža se sastoji od niza trokutastih ravnina koje su dobivene spajanjem susjednih točaka najčešće korištenjem Delaunayeve triangulacije (metoda koja se temelji na pravilu da kružnica prolazi kroz tri vrha Delaunayeva trokuta, a da pritom ne uključuje niti jednu drugu točku) (Weibel i Heller, 1991). TIN model je definiran čvorovima, bridovima, trokutima i topologijom. Neke od prednosti vektorskih podataka su: precizniji prikaz određenih reljefnih objekata, geometrijska preciznost, mogućnost primjene mrežne topologije, manji obujam podataka, brži pristup podacima, primjenjivost za prikaz prostorno diskretiziranih objekata itd. Međutim, glavni nedostaci metode su neizgladene površine i loša ekstrapolacija.

Izohipse

Imaju široku primjenu u hidrologiji jer se pojednostavljuje izrada modela određenog kompleksnog hidrološkog procesa. Bitno je naglasiti da izohipse ili bilo koji drugi skup sličnih visinskih podataka ne predstavlja digitalni model reljefa, jer DMR podrazumijeva kontinuirane visinske podatke na svakoj x, y lokaciji unutar istraživanog područja.



Sl. 4. Osnovne strukture za predstavljanje površina u digitalnom obliku

3. METODE ISTRAŽIVANJA

U znanstvenom procesu, uz opće znanstveno-istraživačke metode, korištene su različite metode, tehnike i procedure. Cilj je bio njihovo integriranje u svrhu dobivanja kvalitetnijih izlaznih rezultata. U istraživanju su primijenjene determinističke i geostatističke metode interpolacije, metode usporedbe metoda interpolacije, metode odabira prostorne (horizontalne) rezolucije, metode batimetrijske izmjere, metode vektorizacije, metode digitalne analize reljefa i metode analize krajobrazne strukture.

3.1. Interpolacija

Interpolacija je postupak računanja nove vrijednosti koja se nalazi između dviju ili više poznatih vrijednosti. Njezin iznos nikada ne prelazi interval određen točkama između kojih se računa, a vrijednosti dobivene interpolacijom svrstavaju se u područje mogućega (Malvić, 2008). Interpolacija je jedna od ključnih sastavnica obrade i analize podataka u GIS okruženju, a predmet je proučavanja statistike i geostatistike (Yang, 2009). Može se reći da je interpolacija proces determinističke ili geostatističke procjene vrijednosti neuzorkovanih područja na temelju skupa izmjerenih (promatranih) vrijednosti s poznatim koordinatama, a sve u svrhu dobivanja kontinuirane površine s nizom vrijednosti.

Problem procjene neke varijable sastoji se od određivanja vrijednosti za određenu točku za koju nisu vršena mjerenja. Ukoliko je poznata udaljenost između nepoznate točke za koju se radi procjena i poznatih točaka, te vrijednosti varijable u poznatim točkama, moguće je doći do procjene cijelog polja neke varijable. Opća formula većine prostornih interpolacija je (Webster i Oliver, 2007):

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Zx_i \quad (1)$$

gdje je:

$Z(x_0)$ = procijenjena vrijednost u točki x_0 ,

Zx_i = izmjerena vrijednost u točki i ,

N = ukupan broj promatranih točaka i ,

λ_i = ponder.

Najveći problem je odrediti ponder λ koji će se koristiti u interpolaciji i pronaći funkciju koja prolazi kroz ili pokraj zadanog skupa točaka (Mitas i Mitasova, 1999).

Uz interpolaciju često se veže i pojam ekstrapolacija koji se odnosi na predviđanje vrijednosti određene varijable na mjestima izvan područja obuhvaćenog izmjerom (Burrough i McDonnell, 1998). Rezultati ekstrapolacije su nesigurni, odnosno svrstavaju se u područje pretpostavljenoga. Većina interpolacijskih metoda temelji se na prvom zakonu geografije (Toblerovom pravilu, 1970): *sve je povezano sa svime, međutim točke koje su bliže jedna drugoj su povezanije.*

Interpolacijske metode se mogu klasificirati na različite načine. Najčešća podjela je na lokalne i globalne, geostatističke i determinističke, točne i približne metode.

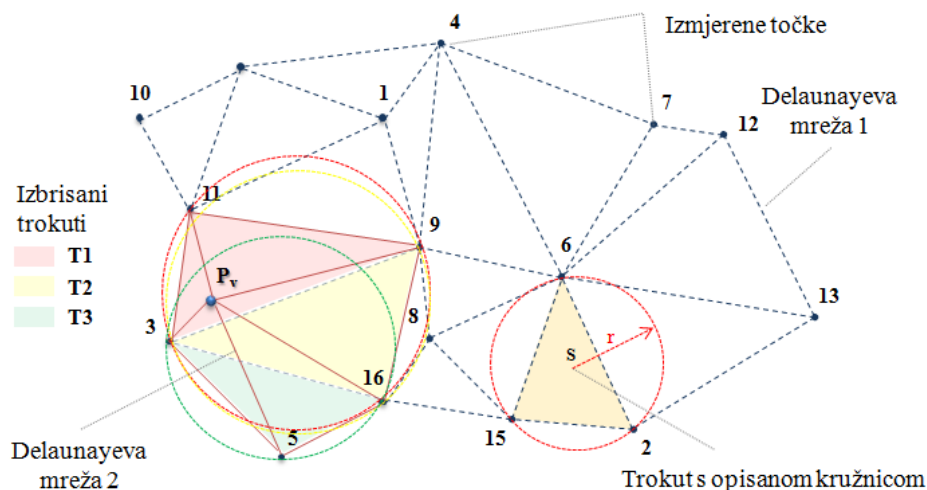
3.1.1. Determinističke metode interpolacije

U primjeni determinističkih metoda koriste se matematičke funkcije za izračunavanje nepoznatih vrijednosti na temelju vrijednosti izmjerenih podataka (Burrough i McDonnell, 1998; Johnston i dr., 2001; Luo i dr., 2008; Negreiros i dr., 2008; Scheuerer i dr., 2010; Eldeiry i Garcia, 2011). Mogu se podijeliti na nekoliko tipova. Prvi tip su metode koje interpoliraju nepoznate vrijednosti prema stupnju sličnosti između susjednih točaka (inverzna udaljenost, lokalna polinomna interpolacija, radijalne osnovne funkcije). Ove metode su lokalnog karaktera jer prilikom izračuna koriste ponderirani prosjek vrijednosti unutar određenog područja (udaljenosti). Drugi tip su globalne funkcije koje se temelje na razini zaglađenosti. Determinističke metode, za razliku od geostatističkih, konceptualno su manje apstraktne jer ne koriste teoriju vjerojatnosti.

3.1.1.1. Triangulacijska nepravilna mreža (*triangulated irregular network*)

Triangulacijska nepravilna mreža (TIN) je metoda interpolacije koja za procjenu nepoznate vrijednosti koristi linearne i nelinearne funkcije (Ripley, 1981; Mitas i Mitasova, 1999). U TIN metodi svi uzorci točaka su povezani nizom trokuta, najčešće na temelju Delaunayeve triangulacije (linearna funkcija) (Watson, 1992). Svaki trokut čini ravninu omeđenu trima linijama i točkama. Za svaki trokut (npr. ABC), vrijedi pravilo da se svi uzorci točaka, osim A, B i C, nalaze izvan opisane kružnice trokuta ABC (Slika 5). Da bi se problem triangulacije mogao svesti na ravninski bitno je poći od pretpostavke da teren ne može imati točke na istim x, y koordinatama i istoj visini (Gjuranić, 2007). Delaunayeva ravninska triangulacija polazi od pretpostavke da su točke ravnine xy projicirane na paraboloid $z=x^2+y^2$ paralelan s osi z, čime je zadovoljeno pravilo triangulacije s najmanje oštih kutova

(optimalno rješenje) (Gjuranić, 2007). Nepoznate vrijednosti točaka procjenjuju se najčešće preko jednog od najbržih i najjednostavnijih algoritama, tzv. rastućeg algoritma. Osnova rastućeg algoritma je dodavanje n nepoznatih točaka u postojeću mrežu (Delaunayeva mreža 1 – DM1), pri čemu vrijedi pravilo da se izbrišu svi trokuti unutar čijih se opisanih kružnica nalazi nova točka (P_v) (Slika 5). Konstruira se nova mreža trokuta (Delaunayeva mreža 2 – DM2) prema ranije definiranim pravilima i postupak se ponavlja (Slika 5). TIN je metoda koja ima široku primjenu, međutim većina autora naglašava brojne nedostatke, posebice kada je razmak između izmjerenih točaka velik (Franke, 1982; Burrough i McDonnell, 1998; Mitas i Mitasova, 1999). Razvojem aero i terestričke laserske tehnologije za prikupljanje visinskih podataka (visoke gustoće) TIN metoda se pokazuje kao optimalna metoda (Ali, 2004).



Sl. 5. Princip Delaunayeve triangulacije

3.1.1.2. Inverzna udaljenost (*inverse distance weighting*)

Inverzna udaljenost je jedna od najčešće korištenih metoda interpolacije jer ne zahtjeva opsežna znanja i donošenje kompleksnih odluka kod izbora parametara (Mitas i Mitasova, 1999). Metoda se temelji na pretpostavci da izmjerene točke koje su udaljenije od lokacije za koju se procjenjuje vrijednost imaju manji utjecaj na istu. Nepoznate vrijednosti procjenjuju se na temelju vrijednosti okolnih izmjerenih točaka. Opća formula inverzne udaljenosti je (Li i Heap, 2008):

$$z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (2)$$

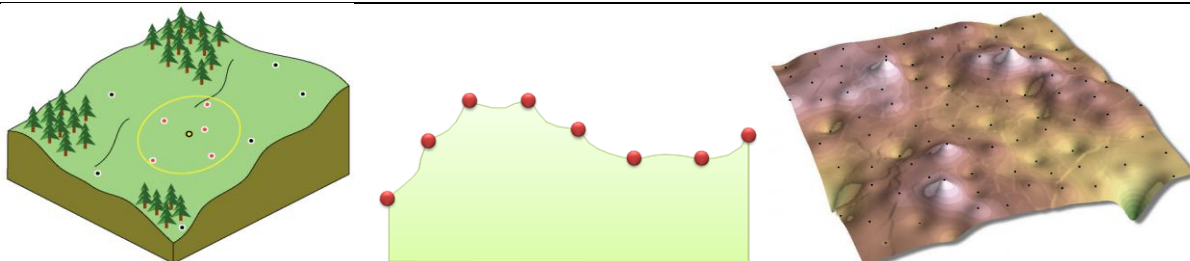
gdje je:

$z(s_0)$ = predviđena vrijednost na lokaciji s_0 ,

N = broj izmjerenih točaka oko lokacije predviđanja,

λ_i = ponderi dodijeljeni pojedinim izmjerenim točkama i

$Z(s_i)$ = uočena vrijednost na lokaciji (s_i).



Sl. 6. Metoda inverzne udaljenosti (preuzeto iz: *ArcGIS Desktop*)

Određenom broju izmjerenih točaka unutar definiranog radijusa (udaljenosti) dodjeljuju se težinski koeficijenti (ponderi). Ponder se može izraziti formulom:

$$\lambda_i = \frac{1/d_i^p}{\sum_{i=1}^n 1/d_i^p} \quad (3)$$

gdje je:

d_i = udaljenost između izmjerenih (uzorkovanih) vrijednosti točaka i neuzorkovane točke čija se vrijednost procjenjuje,

n = broj izmjerenih točaka koje se koriste za procjenu

p = eksponent udaljenosti (*power*)

Glavni faktor koji utječe na točnost izlaznih rezultata je eksponent udaljenosti (stupanj jačine) (*power*) (Isaaks i Srivastava, 1989). Korišteni softver nudi mogućnost odabira eksponenta udaljenosti. To je težinski parametar koji kontrolira ovisnost težine i udaljenosti (Burrough, 1986; Watson, 1992.) Ovisno o eksponentu udaljenosti ovisi hoće li vrijednost težinskih koeficijenata biti jednaka za sve točke ili će biti jača za točke koje su bliže vrijednosti koja se procjenjuje. Npr. ako je $p = 0$ tada nema opadanja utjecaja s udaljenosti, jer je ponder jednak za sve točke, a procijenjena vrijednost je srednjak proračunskih točaka. Izbor eksponenta udaljenosti je proizvoljan, međutim najčešće se koristi vrijednost 2 koja se naziva i inverzni kvadrat udaljenosti (Watson, 1992; Brus i dr., 1996; Webster i Oliver, 2001; Luo i dr., 2007).

Kod metode inverzne udaljenosti ne može se dogoditi da procijenjena (uprosječena) vrijednost bude veća od minimalne i maksimalne vrijednosti okolnih izmjerenih točaka koje se koriste za proračun. Algoritam je integriran u većinu softvera, lako razumljiv, omogućuje brz izračun i dobar je za analiziranje lokalnih anomalija (Lam, 1983). Međutim, on sadrži i određene nedostatke, prije svega pojavu velikog broja artefakata (Slika 6). Lokalne anomalije se smanjuju većom gustoćom točaka i većom zonom utjecaja.

3.1.1.3. Prirodni susjed (*natural neighbor*)

Prirodni susjed jedna je od najpopularnijih metoda interpolacija, sa širokom primjenom u geografskom i geofizičkom modeliranju, mehanici itd. (Boissonnat i Cazals, 2001; Unger, 2003; Fan i dr., 2005). Ona kombinira najbolje značajke metoda najbližih susjeda i triangulacijske nepravilne mreže (Webster i Oliver, 2007). To je metoda ponderiranog prosjeka koja procijenjuje vrijednost pomoću lokalnih koordinata prirodnog susjeda na temelju Voronoijeve teselacije (proces stvaranja dvodimenzionalne ravnine ponavljanjem geometrijskih oblika bez preklapanja i praznina). Svaki Voronoijev poligon izgrađen je od dijelova trokuta koji proizlaze iz Deulaunayeve triangulacije, pri čemu vrhovi poligona predstavljaju centroide trokuta (Slika 7) (Boissonnat i Cazals, 2001; Beutel i dr., 2010; 2011). Interpolirana vrijednost je određena vrijednostima izmjerenih točaka koje je okružuju, pri čemu vrijedi pravilo da je interpolant svugdje osim na uzorku čija je vrijednost poznata. Međutim, sve okolne točke ne ulaze u procjenu nove vrijednosti i nemaju jednaki težinski koeficijent.

Da bi se odredila lokalna koordinata procijenjivane vrijednosti p_v , potrebno je poznavati broj točaka i površinu svih poligona u mreži. Princip rada metode je sljedeći (Slika 7): u područje Voronoijeve nepravilne mreže se privremeno integrira točka P_v na određenu koordinatu. To rezultira promjenom u mreži, točnije stvaranjem novog poligona koji je nastao Voronoijevom metodom. On se preklapa sa starom mrežom, pri čemu novi poligon prividno sadržava više segmenata starijih poligona koji imaju različite površine. Stari poligoni, nastali prije umetanja nepoznate nasumične lokalne koordinate P_v , na slici 7 su prikazani točkasto. Kod određivanja pondera vrijedi pravilo da se većem poligonu pridodaje veći težinski koeficijent i obrnuto. Iz slike 7 je vidljivo da na točku P_v od prikazanih 16 točaka utječe 5 točaka (3, 11, 9, 16 i 5), da najveći težinski koeficijent (ponder) ima točka 3 (0,583), a najmanji točka 5 (0,002). Zbroj koeficijenata za točke koje utječu na procjenu nepoznate vrijednosti mora iznositi 1.

Jednadžba metode prirodni susjed identična je formuli inverzne udaljenosti. Razlikuju se po metodi određivanja težinskih koeficijenata i metodi odabira izmjerenih točaka kojima se procjenjuje nova vrijednost. Formula prirodnog susjeda je (Ledoux i Gold, 2004):

$$G(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f(x_i, y_i) \quad (4)$$

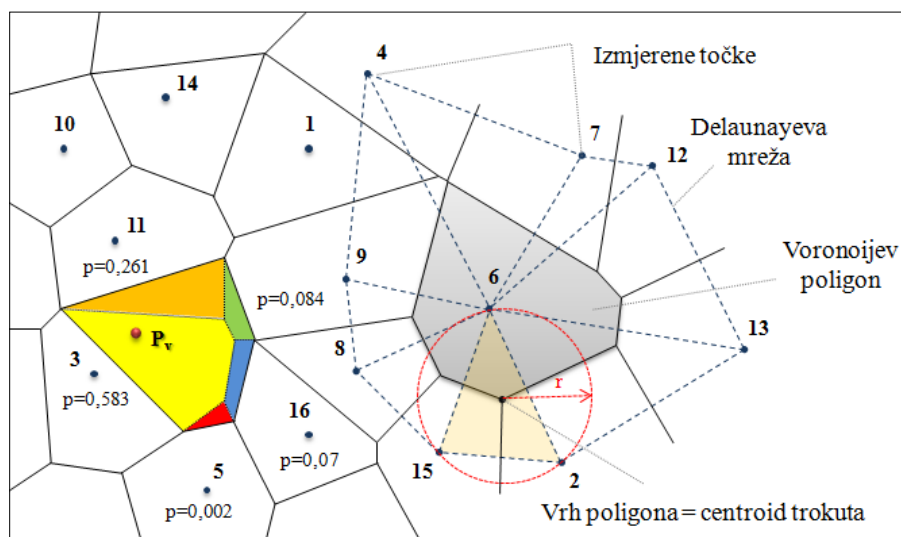
gdje je:

$G(x, y)$ = procijenjena vrijednost na x, y lokaciji,

n = broj najbližih susjeda koji se koriste za procjenu,

$f(x_i, y_i)$ = promatrana vrijednost na x_i i y_i ,

w_i = težinski koeficijent

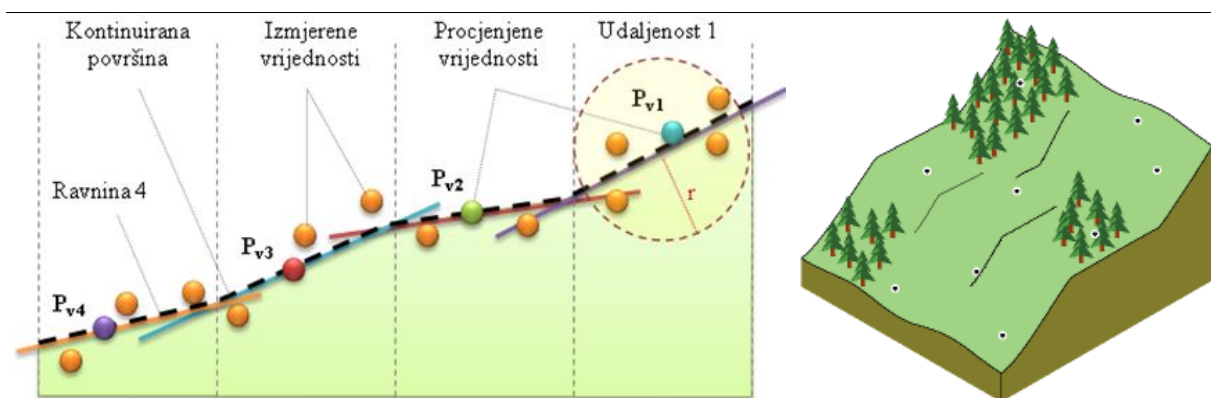


Sl. 7. Princip metode prirodni susjed

3.1.1.4. Lokalna polinomna interpolacija (*local polynomial interpolation*)

Lokalna polinomna interpolacija je brz deterministički interpolator, fleksibilniji od metode globalne polinomne interpolacije koja stvara površinu iz jedne formule polinoma koristeći sve izmjerene podatke (Johnston i dr., 2001). Za razliku od globalne, lokalna u izmjerene točke uklapa više polinomnih linija ili ravnina unutar definiranog susjedstva, koje u konačnici konstruiraju kontinuiranu neravninu (Burrough i McDonnell, 1998). Sjecišta linija ili ravnina nazivaju se čvorovi. Metoda zahtjeva određivanje (postavljanje) parametara (eksponent udaljenosti, broj susjeda (točaka), udaljenost, tip sektora). Na temelju postavljenih parametara stvara se površina koja prikazuje lokalne varijacije. Nepoznata vrijednost se procjenjuje na temelju poznatih vrijednosti (izmjerenih točaka) unutar ranije definirane

udaljenosti (susjedstva). Princip rada metode je da prvi polinom prvog stupnja uklapa ravninu kroz skup izmjerenih podataka unutar zadane udaljenosti, pri čemu se vrijednost na procijenjenoj lokaciji zadržava. Točnije, ta se vrijednost kod procjene druge nepoznate vrijednosti ne uzima u obzir. Zadana udaljenost se premješta na drugu nepoznatu lokaciju i proces se nastavlja. Drugi polinom prvog stupnja unutar definiranog susjedstva uklapa novu ravninu tako da se stvara površina s lukom. Kod trećeg polinoma prvog stupnja javlja se površina s dva luka itd. Formula polinoma prvog stupnja je $u_0(x_i, y_i) = a_0 + a_1 * x_i + a_2 * y_i$.



Sl. 8. Princip lokalne polinomne interpolacije (prema: *ArcGIS Desktop*)

Na slici 8 je prikazan proces konstruiranja kontinuirane površine (prikazane profilno) iz 4 ravnine izračunate pomoću polinoma prvog stupnja. Prva ravnina i nepoznata vrijednost P_{v1} su izračunati iz 4 izmjerene točke unutar unaprijed definiranih udaljenosti. Kod pojedinih softverskih rješenja (npr. *Surfer*) moguć je odabir polinomnog stupnja (prvog ili linearnog, drugog ili kvadratnog, trećeg ili kubičnog) za konstruiranje kontinuirane površine iz izmjerenih podataka. Lokalnu polinomnu interpolaciju nije dobro koristiti ukoliko je razmak između izmjerenih točaka velik, jer se ne dobiva dobra aproksimacija (prikaz je grub, „stubast“) i obrnuto.

Formula lokalne polinomne interpolacije je (Luo i dr., 2007):

$$\sum_{i=1}^n w_i (Z(x_i, y_i) - u_0(x_i, y_i))^2 \quad (5)$$

gdje je:

$Z(x_i, y_i)$ = izmjerena vrijednost na lokaciji x_i, y_i ,

n = broj izmjerenih točaka unutar dosega,

$u_0(x_i, y_i)$ = vrijednost polinoma,

w_i = težinski koeficijent izražen formulom

$$w_i = \exp(-3d_{i0} / a) \quad (6)$$

gdje je:

d_{i0} = udaljenost između točaka i središta unaprijed zadanog područja pretraživanja,

a = parametar kontrole (tj. koliko će težinski koeficijent opadati s udaljenosti)

3.1.1.5. Radijalne osnovne funkcije (*radial basis functions*)

Radijalne osnovne funkcije predstavljaju egzaktni interpolator (Aguilar i dr., 2005; Chaplot i dr., 2006) koji ima široku primjenu u različitim znanstvenim područjima (Carr i dr., 1997; Sarra i Kansa, 2009; Skala, 2010). Koristi se više radijalnih Kernelovih funkcija: tankoslojni splajn, splajn s tenzijom, potpuno regulirani splajn, multikvadratna ROF, inverzna multikvadratna ROF, koje su analogne variogramima u krigingu (Johnston i dr., 2001). Na temelju kernel funkcija definira se optimalni skup težinskih koeficijenata koji se onda dodjeljuju izmjerenim točkama, ovisno o udaljenosti. O odabiru funkcije, između kojih postoje razlike u izračunu, ovise izlazni rezultati (Fasshauer i dr., 1999). Za radijalne funkcije je karakteristično da se njihov utjecaj jednolično smanjuje ili povećava s udaljenošću od točke za koju se procjenjuje vrijednost. Koriste se za izračunavanje (dobivanje) zaglađenih površina pomoću većeg broja izmjerenih točaka. Nisu prikladne za stvaranje modela, ukoliko na manjim udaljenostima postoje velike razlike između izmjerenih vrijednosti (Johnston i dr., 2001). Metoda umanjuje ukupnu zakrivljenost jer polinomna površina mora proći kroz (ili neposredno pored) izmjereni uzorak i istovremeno biti zaglađena ukoliko je moguće (Slika 9) (Talami i Gilat, 1977). Vrijednost varijable Z u točki s_0 , može se izraziti kao zbroj dvije komponente (Mitasova i Mitás, 1993; Pearlstine i dr., 2011):

$$Z(s_0) = p(x) + \sum_{i=1}^n w_i \phi(\|s_i - s_0\|) \quad (7)$$

gdje je:

$p(x)$ = polinom određenog stupnja,

$\phi(r)$ = radijalna osnovna funkcija,

$r = \|s_i - s_0\|$ = euklidska udaljenost između lokacije za koju se procjenjuje vrijednost s_0 i izmjerenih podataka na lokaciji s_i ,

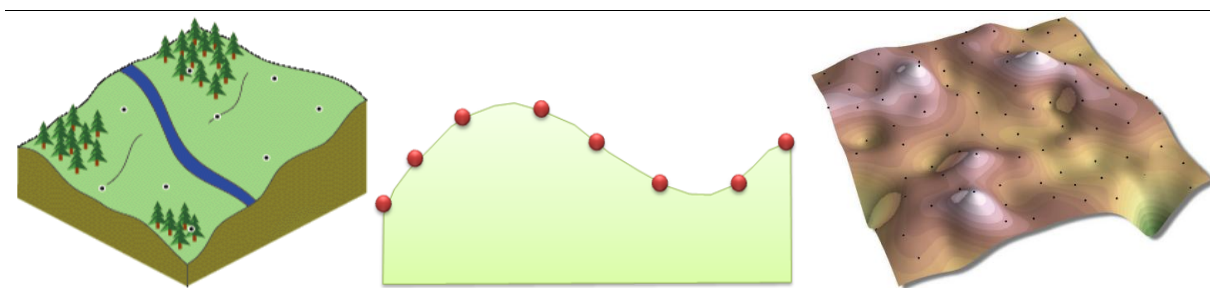
w_i = težinski koeficijenti

Bez obzira na sličnost funkcija, većina autora (Franke, 1982; Lazzaro i Montefusco, 2002) predlažu multikvadratnu metodu jer daje najbolje rezultate u smislu statističkih i vizualnih procjena modelirane površine, čak i u slučaju raspršenijih podataka. Formula multikvadratne metode je:

$$\sigma(r) = (r^2 + \sigma^2)^{1/2} \quad (8)$$

gdje je σ optimalni parametar zaglađivanja.

Vrijednost parametra σ ovisi o broju točaka, vrijednostima (npr. dubina ili visina) i prostornom rasporedu izmjerenih točaka (Rippa, 1999). Ne postoji opće prihvaćena metoda za određivanje faktora zaglađivanja, iako postoje različiti empirijski tipovi aproksimacije (Hardy, 1971; Franke, 1982; Li i Chen, 2002).



Sl. 9. Radijalne osnovne funkcije (preuzeto iz: *ArcGIS Desktop*)

3.1.1.6. ANUDEM (*Australian National University DEM*) ili *Topo to raster*

ANUDEM je interpolacijska metoda posebno dizajnirana za stvaranje hidrološki točnog digitalnog modela reljefa (Childs, 2004; Cheveresan, 2012). Voda svojim erozivnim djelovanjem značajno utječe na oblikovanje krajobraza, stoga je iznimno bitno kako će se prirodni odnosi složenog drenažnog sustava optimalno prikazati modelom. Metoda se temelji na programu ANUDEM kojeg je razvio Hutchinson (1989) i zapravo predstavlja modificirani tankoslojni splajn, koji uzima u obzir nagle promjene u površini modela, kao što su grebeni, jaruge, potoci itd. (Wahba, 1990). U metodi se koristi Gauss-Seidkerova iterativna metoda izračuna (Childs, 2004; Peralvo, 2004) koja je optimizirana da bude računski učinkovita kao lokalna interpolacijska metoda (npr. inverzna udaljenost), međutim bez gubljenja površinskog kontinuiteta koji je karakterističan za globalne interpolacijske metode (Childs, 2004). Raščlanjenost je definirana funkcijom prvog i drugog stupnja parcijalne derivacije f interpolacijske funkcije prema sljedećim jednadžbama (Peralvo, 2004):

$$J_1(f) = \int (f_x^2 + f_y^2) dx dy \quad (9)$$

$$J_2(f) = \int (f_{xx}^2 + 2f_{xy}^2 + f_{yy}^2) dx dy \quad (10)$$

Minimiziranje J_2 rezultira nerealno glatkom površinom, dok minimiziranje J_1 stvara oštiri lokalni maksimum i minimum na uzorcima gdje rezolucija postaje bolja. Hutchinsom (1989) je pronašao empirijski kompromis između J_1 i J_2 , definiranjem algoritma raščlanjenosti prema formuli (Peralvo, 2004):

$$J(f) = 0.5 \times h^{-2} J_1(f) + J_2(f) \quad (11)$$

gdje je h prostorna rezolucija.

Hutchinson je (1996) ugradio prostorno promjenjivu statističku procjenu pogreške uvođenjem korištenja kvadratne mreže za prikaz visina. Ova modifikacija dovodi razinu uglaćavanja u interpolaciji do lokalnog prilagođavanja nagibu reljefa. Svrha metode je identificirati i ukloniti sve lažne lokalne erozijske baze (*sinkove*) u izlaznom modelu, jer program pretpostavlja da su svi nepoznati *sinkovi* pogreške s obzirom da je njihova pojavnost u prirodi vrlo rijetka (Goodchild i Mark, 1987). Algoritam ne uklanja *sinkove* koji imaju visinske razlike više nego što ih korisnik definira vertikalnom tolerancijom (zadana vrijednost je obično pola ekvidistance). Algoritam omogućava uključivanje podataka o linijama tokova, što omogućava da se svaki tok prilagodi dnu doline. Algoritam preferira korištenje izohipsi kao primarnih ulaznih podataka za izradu hidrološki ispravnog modela. Temelji se na identifikaciji područja najveće zakrivljenosti u svakoj izohipsi.

3.1.2. Geostatističke metode interpolacije

Stohastičke ili geostatističke metode za određivanje nepoznatih vrijednosti koriste matematičke i statističke metode (Burrough i McDonnell, 1998; Johnston i dr., 2001; Hengel, 2007; Eldeiry i Garcia, 2011). Za stvaranje kontinuiranih površina koriste se statistička svojstva primjenom metoda prostorne autokorelacije između podataka i trendova površine (npr. kriging metode) (Smith i dr., 2003). Moderna geostatistika, koja se u velikoj mjeri poklapa s pojmom prostorno-vremenske statistike, može se definirati kao grana statistike koja je specijalizirana za analize, procjene i interpretacije različitih prostornih (i vremenskih) podatka (Journel, 1986). Ona proučava prostornu ovisnost među podacima/varijablama, pri čemu je važna dimenzija, veličina i položaj varijable (Andričević i dr., 2006). Batimetrijski i

aerofotogrametrijski izmjereni podatci su trodimenzionalne varijable jer sadrže koordinate točaka s izmjerenim dubinama jezera i visinama reljefa.

Geostatistika je skup više tehnika i teorija koje se koriste za generiranje statističkih modela dobivenih određenom metodom autokorelacije na temelju precizno izmjerenih vrijednosti točkastih uzoraka (Hengel i dr., 2009). Geostatističke metode interpolacije polaze od pretpostavke da je poznavanjem vrijednosti nekog svojstva u poznatim točkama, moguće ustanoviti njegovu vrijednost i u nepoznatim točkama (Medved i dr., 2010).

Geostatističko istraživanje uključuje tri koraka: 1) analizu izmjerenih podataka, 2) strukturnu analizu (proračun i modeliranje semivariograma) i 3) predviđanje (npr. kriging) (Shibili, 2003). Ove metode, za razliku od determinističkih, ne omogućuju samo izračunavanje pogreške procijenjene vrijednosti nego i njene statistike. Stohastičke metode koriste semi-variogram kao temeljni alat karakterizacije prostorne ovisnosti objekata. Semi-variogram prikazuje strukturu slučajnog polja, a koristi se za određivanje ponašanja odabranih varijabli u prostoru, odnosno za definiranje njihove zavisnosti (Malvić i Gaćeša, 2006). Rezultat izrade variograma je eksperimentalni variogram koji se aproksimira teorijskim modelom (Malvić, 2008). Stoga je vrlo važno odabrati optimalan teorijski model i ostvariti što bolju aproksimaciju.

Specifičnost ovih metoda je u činjenici se interpolacija vrši na temelju statističkih karakteristika izmjerenih točaka.

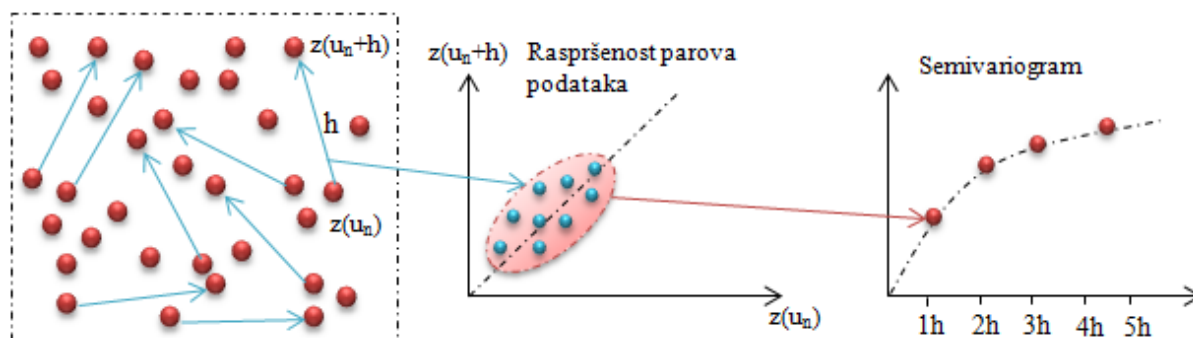
3.1.2.1. Kriging

Kriging je geostatistička interpolacijska metoda svrstana u kategoriju najboljeg linearnog nepristranog procjenitelja (Slika 13) (BLUE – *Best Linear Unbiased Estimators*) (Skoien i dr., 2005; Kleijnen, 2007). Smatra se najzahtjevnijom i najčešće korištenom metodom interpolacije, za čije je pravilno i uspješno korištenje potrebno opsežno znanje. Prostorno variranje nekog svojstva Z u geostatistici se temelji na konceptu regionalizirane varijable (Malvić, 2008). Matematički regionalizirana varijabla $Rvar$ je jednostavna funkcija $f(x)$ koja na svakoj točki x , s koordinatama (x, y, z) , ima određenu vrijednost (Miloš, 2000). Za razliku od inverzne udaljenosti u kojoj težinski koeficijent ovisi o udaljenosti, u metodi kriging težinski koeficijent ovisi o udaljenosti i prostornom odnosu između izmjerenih točaka koje utječu na točku za koju se procjenjuje vrijednost. U radu su korištene 4 kriging tehnike: obični, jednostavni, univerzalni i disjunktivni kriging. Razlika između ovih metoda je u

pretpostavci položaja srednjaka određene (interpolirane) varijable (Krivoruchko i Gotway, 2004).

Najznačajnije svojstvo kriginga je da mjerene veličine zadržava kao fiksne, što znači da izravno uključuje izvorni skup podataka koji se u procesu interpolacije neće mijenjati (Pribičević i dr., 2007; Medved i dr., 2010).

Prilikom izračuna nepoznatih vrijednosti, sve tehnike osim jednostavnog kriginga imaju faktore ograničenja u svrhu minimiziranja pogreške varijance. Kriging metoda je postupak kojem prethodi modeliranje (analiza) semivariograma, odnosno određivanje prostorne varijabilnosti točaka, udaljenost i smjer (Bezzi i Vitti, 2005). Variogram je osnovno sredstvo vrednovanja i kvantificiranja prostorne zavisnosti odabrane varijable u prostoru (Malvić i Gaćeša, 2006). U praksi, variogram predstavlja prosjek kvadrata razlika dviju vrijednosti računatih kao funkcije udaljenosti tih vrijednosti (Medak, 2009). Semivariogram je temeljni pojam geostatistike i prikazuje strukturu slučajnog polja koje može ovisiti samo o udaljenosti između dviju mjernih točaka i razlici vrijednosti između njih (Andrijević i dr., 2007).



Sl. 10. Primjer kreiranja eksperimentalnog variograma (prema: Shibili, 2003)

Prvi korak u modeliranju variograma predstavlja određivanje eksperimentalnog variograma iz mjernih podataka (Slika 10). To se odnosi na grafički prikaz varijance kao funkcije udaljenosti, pri čemu vrijedi pravilo da manja udaljenost rezultira manjom varijancom i obrnuto (Miloš, 2000). Eksperimentalni variogram sadrži sve nedostatke kojima su mjerenja podložna i nema egzaktni karakter. Ključno svojstvo eksperimentalnog variograma jest da se ne analiziraju stvarne vrijednosti varijable nego njihove razlike (Shibli, 2003; Andrijević i dr., 2007). Kod određivanja eksperimentalnog variograma najprije se odredi udaljenost i kvadratna razlika između parova točaka. Udaljenost između dvije točke se računa prema formuli: $u_{ij} = ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{1/2}$ koristeći pritom euklidsku udaljenost (Johnston i dr., 2001). Empirijska varijanca jednaka je 0,5 puta kvadratna razlika. Da bi se povećao broj

parova točaka, udaljenost se dijeli na klase (*number of lags*). Svaka klasa ima domet (*lag size*). Klasa i domet zapravo predstavljaju ukupnu udaljenost unutar koje se podatci međusobno uspoređuju.

Pojmovi variogram i semivariogram su identični jer je variogramsku jednadžbu moguće pojednostaviti tako da se jednadžba pomnoži s brojem 2 te se dobivena funkcija 2γ naziva semivariogram, koji glasi (Isaaks i Srivastava, 1989; Bohlig, 2005; Li i Heap, 2008; Malvić i Saftić, 2008; Yasrebi i dr., 2009):

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n(h)} \times \sum_{n=1}^n [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (12)$$

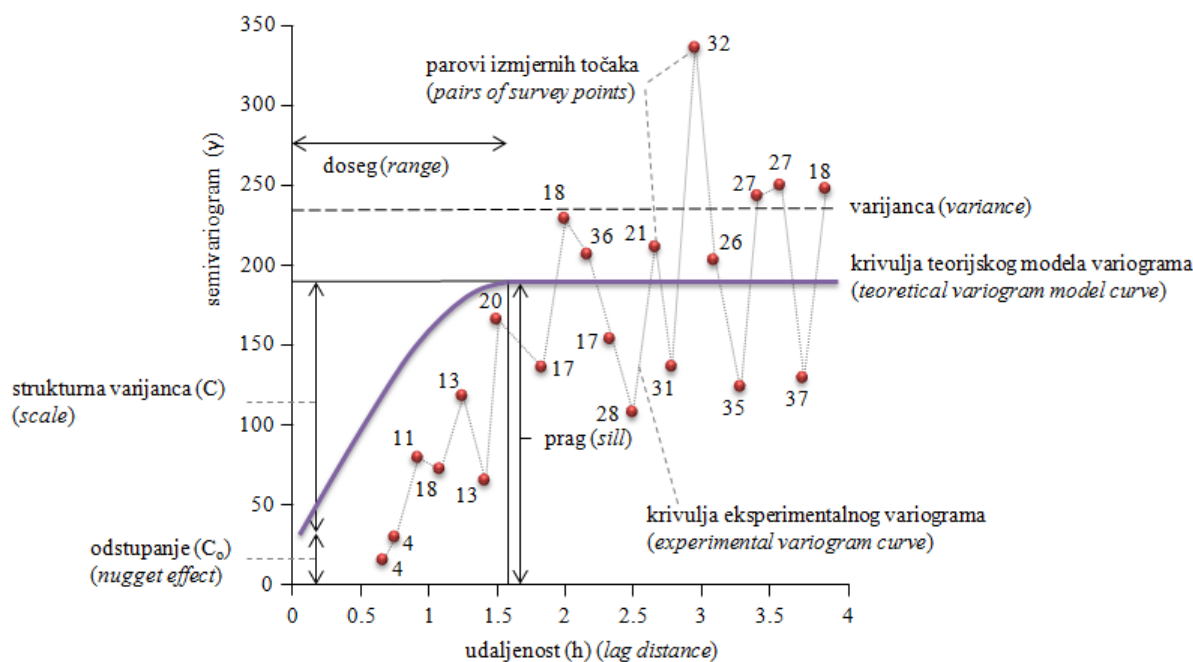
gdje je:

$2\gamma(h)$ = semivariogram (razlika između susjednih vrijednosti)

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

$z(x_i)$ = vrijednost na lokaciji (koordinati) x_i

$z(x_i+h)$ = vrijednost na lokaciji (koordinati) x_i+h .



Sl. 11. Sastavnice semivariograma (prema: Golden Software, 2002)

Semivariogram se sastoji od sljedećih parametara (Slika 11):

- 1) Doseg (*range*) – predstavlja vrijednost udaljenosti na kojoj se semivariogram prvi put zaravnava (postaje konstanta) i presijeca prag, nakon čega ne postoji prostorna ovisnost podataka (Miloš, 2000; Barnes, 2003; Malvić, 2008). U sfernome,

eksponecijalnoma i Gaussovu modelu, koji se pragu približavaju asimptotski (odnosno nikada ne dostignu vrijednost praga), primjenjuje se “praktični” ili “efektivni” doseg koji se računa na mjestu gdje funkcija doseže približno 95% praga (Malvić, 2008). Model čistoga odstupanja (*nugget model* ili *nugget effect*) funkcija je bez dosega (iznosi 0), tj. između podataka ne postoji nikakva prostorna veza. Kod linearnoga modela pojmovi prag i doseg služe samo za određivanje nagiba (Malvić, 2008).

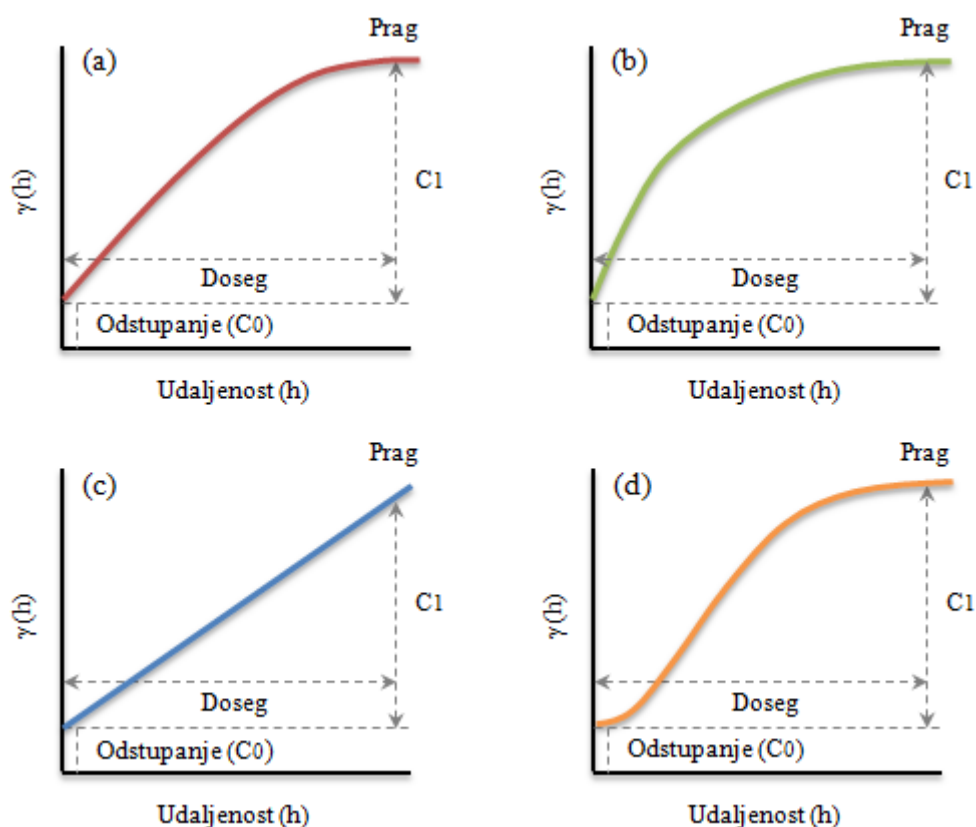
- 2) Prag ($C + C_o$) (*sill*) – predstavlja prostornu varijancu ili razliku pojedinačnih vrijednosti i srednje vrijednosti skupova podataka (Malvić, 2008).
- 3) Odstupanje (C_o) (*nugget*) ili grumen učinak – teoretski predstavlja vrijednost variograma na nultoj udaljenosti tj. sječe li odabrani teorijski model ordinatu na 0 ili u nekoj drugoj pozitivnoj vrijednosti (Bohling, 2005). Učinak odstupanja javlja se i na izrazito malim prostornim udaljenostima. On može biti rezultat neprecizne izmjere ili varijabilnosti koja se javlja na malim udaljenostima (Bohling, 2005; Carrasco, 2009). Odstupanje se može smanjiti povećanjem broja uzoraka, međutim u praksi se ono vrlo često ne može eliminirati. Izbor vrijednosti odstupanja u modelu semivariograma utjecat će na točnost interpolacije.
- 4) Strukturna varijanca (C) (*scale*) – predstavlja vertikalni kriterij semivariograma koji je različit za svaku komponentu modela (Barnes, 2003)
- 5) Udaljenost (*lag distance*) je zadana vrijednost na kojoj se međusobno uspoređuju izmjereni podatci. Udaljenost se zbog preciznijih izlaznih rezultata dijeli u klase (*number of lags*). Svaka klasa ima udaljenost (*lag size*). Iz prethodnog se može zaključiti da su udaljenosti unutar kojih se uspoređuju podatci, broj klasa i udaljenost između klasa proporcionalno povezani.

Ukoliko je prilikom modeliranja definiran smjer, radi se o anizotropnom semi-variogramu¹, a ako smjer nije definiran riječ je o izotropnom. Modeliranje semi-variograma uključuje i uključivanje eksperimentalnog semivariograma u teorijski model (npr. sferni), ovisno o karakteristikama podataka. Na taj način semi-variogram aproksimira funkciju koja najbolje odgovara podacima.

U korištenoj GIS ekstenziji se nalazi 11 teorijskih modela: kružni (*circular*), sferni (*spherical*), tetrasferni (*tetraspherical*), pentasferni (*pentaspherical*), eksponencijalni

¹ Pojava kada je variogramski doseg veći (tj. bolja je autokorelacija podataka) u jednome nego u drugome smjeru. U širem smislu anizotropija je pojava kada promatrana varijabla pokazuje različita prostorna ili numerička obilježja u različitim smjerovima (Malvić, 2008).

(*exponential*), Gaussov, racionalno kvadratni (*rational quadratic*), efekt šupljine (*hole effect*), K-Bessel, J-Bessel i stabilni (*stable*) (Royle, 1981; Burrough, 1986; Heine, 1986; McBratney, 1986; Press, 1988; Oliver, 1990). Metode se razlikuju po tome imaju li prag te po načinu ponašanja krivulje u blizini ishodišta. Najširu primjenu i najbolje rezultate imaju 4 teorijska modela: sferni, eksponencijalni, linearni i Gaussov (Burrough i McDonnell, 1998; Malvić, 2008) (Slika 12). Ipak, treba naglasiti da ne postoji univerzalno pravilo kada i kako odabrati određeni teorijski model (Andričević i dr., 2007).



Sl. 12. Najkorišteniji teorijski modeli (prema: Golden Software, 2002)
a) sferni; b) eksponencijalni; c) linearni; d) Gaussov

Na temelju modeliranog semivariograma može se procijeniti varijanca na bilo kojoj udaljenosti. Pomoću semivariograma, izmjerenim vrijednostima koje ulaze u proračun pridružuje se ponder ili težinski koeficijent (procijenjen je utjecaj susjednih točaka na točku za koju se procijenjuje vrijednost). Pri tome vrijedi pravilo da je procijenjena varijanca na novoj točki minimalna i da je očekivana vrijednost razlike između procijenjene i stvarne vrijednosti jednaka 0. Određivanje pondera je najzahtjevniji dio algoritma kriginga, čija kvaliteta ovisi o izrađenom semivariogramskom modelu (analizi) (Bohling, 2005). U pravilu,

model s većim brojem izmjerenih (kontrolnih) točaka, većim dosegom i manjim odstupanjem imat će puno veću pouzdanost kod procjene težinskih koeficijenata (Malvić, 2005). Međutim, odstupanje, prag i doseg ovise o zadanoj udaljenosti (broju odmak) i smjeru.

Procijenjene vrijednosti i težinski faktori izračunavaju se rješavanjem sustava linearnih jednadžbi kriginga, prema formuli (Johnston i dr., 2001):

$$\lambda_0 = \mathbf{K}^{-1} * \mathbf{C}_0 \quad (13)$$

gdje je:

\mathbf{K}^{-1} = kriging matrica, odnosno semivarijanca između parova izmjerenih točaka,

\mathbf{C}_0 = semivarijanca između izmjerene točke i točke za koju se procijenjuje vrijednost

Učinkovitost metode ovisi o izboru parametara koji utječu na kvalitetu rezultata.

Primjena metode kriginga zahtjeva određivanje unaprijed definiranih kriterija kojima se mora zadovoljiti pravilo da procjena bude nepristrana te da kriging varijacija između izmjerenih i procijenjenih vrijednosti mora biti najmanja moguća (Johnston i dr., 2001; Malvić, 2008, Malvić i Balić, 2009). Kriging varijacija koristi se za vrednovanje kvalitete procijenjenih vrijednosti, na temelju razlika između procijenjenih i izmjerenih vrijednosti za svaku točku.

Sve varijante kriging procjenitelja temelje se na osnovnoj formuli (Goovaerts, 1997; Hengel, 2007; Li i Heap, 2008):

$$\hat{Z}(x_0) - \mu = \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z(x_i) - \mu(x_0)] \quad (14)$$

gdje je:

μ = poznata stacionirana vrijednost², koja je konstanta,

λ_i = ponder ili težinski koeficijent za svaku lokaciju i ,

n = broj točaka (uzoraka) koji se koriste za procjenu nepoznate vrijednosti i ovisi o zadanoj udaljenosti,

$\mu(x_0)$ = srednjak unutar definirane udaljenosti.

Težinskim koeficijentima kriginga minimizira se iznos varijance, pomoću sljedeće formule (Li i Heap, 2008):

² Postoje dvije vrste stacioniranosti: srednja stacioniranost – pretpostavlja se da je srednja vrijednost konstanta između uzoraka i da je neovisna o lokaciji i stacioniranost drugog reda – pretpostavka da je kovarijanca ista između bilo koje dvije točke koje se nalaze na istoj udaljenosti.

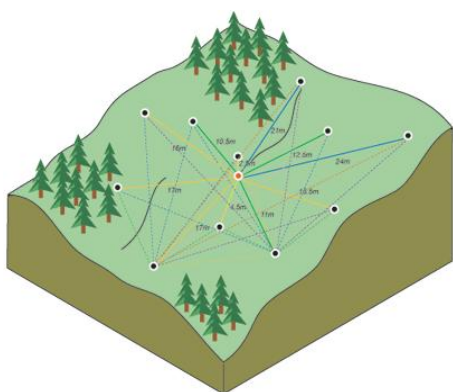
$$\begin{aligned}
\text{var}[\hat{Z}(x_0)] &= E\left[\{\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)\}^2\right] \\
&= E\left[(\hat{Z}(x_0))^2 + (Z(x_0))^2 - 2\hat{Z}(x_0)Z(x_0)\right] \\
&= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C(x_i - x_j) + C(x_0 - x_0) - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - x_0)
\end{aligned} \tag{15}$$

gdje je:

$Z(x_0)$ je vrijednost koja se očekuje u točki x_0 ,

n je broj opažanja (uzoraka) koji moraju ući u procjenu i

$C(x_i - x_j) = \text{Cov}[Z(x_i), Z(x_j)] =$ funkcija kovarijance (Isaaks i Srivastava, 1989).



Sl. 13. Kriging metoda (pruzeto iz: *ArcGIS Desktop*)

3.1.2.2. Kokriging (*cokriging*)

Kokriging poput kriginga obuhvaća nekoliko metoda procjene i predstavlja snažnu nadogradnju kriging metode (Horvatinec, 2008). Kokriging računa korelaciju između primarne varijable i zavisne sekundarne varijable. Smatra se kako je sekundarna varijabla gušće uzorkovana nego primarna, a u isto vrijeme u određenoj je zavisnosti s primarnom varijablom. Stoga može pomoći i poboljšati njezinu procjenu.

Značajnost ili jakost veze primarne i sekundarne varijable najčešće se računa korelacijom, bilo linearnom ili nelinearnom. Pearsonov korelacijski koeficijent koristi se uz pretpostavku da između varijabli postoji linearna povezanost i neprekidna normalna distribucija. Vrijednost Pearsonovog koeficijenta kreće se u rasponu između +1 i -1, što upućuje na to je li autokorelacija u potpunosti pozitivna, negativna ili između. Spearmanov koeficijent korelacije ranga koristi se u slučajevima kada nije moguće upotrijebiti Pearsonov koeficijent. Kokriging je izražen sljedećom formulom (Li i Heap, 2008)

$$\hat{Z}_1(x_0) - \mu_1 = \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_{i_1} [Z_1(x_{i_1}) - \mu_1(x_{i_1})] + \sum_{j=2}^{n_v} \sum_{i_j=1}^{n_j} \lambda_{i_j} [Z_j(x_{i_j}) - \mu_j(x_{i_j})] \quad (16)$$

gdje je:

μ_1 = poznata stacionirana srednja vrijednost primarne varijable,

$Z_1(x_{i1})$ = stvarna vrijednost na lokaciji 'i' za prvu varijablu,

$\mu_1(x_{i1})$ = srednja vrijednost unutar radijusa pretraživanja,

n_1 = broj uzoraka unutar radijusa pretraživanja za točku x_0 korištenih za procjenu,

λ_{i1} = težinski koeficijent na lokaciji 'i' za prvu varijablu

n_v = broj sekundarnih varijabli,

n_j = broj j-tih sekundarne varijable unutar radijusa pretraživanja,

λ_{ij} = težinski koeficijent dodijeljen ij-im točkama j-te sekundarne varijable i

$\mu_j(x_{ij})$ = srednja vrijednost uzoraka j-te sekundarne varijable s poznatim radijusom pretraživanja.

Unakrsna semivarijanca se može procijeniti iz podataka koristeći jednadžbu (Li i Heap, 2008; Webster i Oliver, 2007):

$$\hat{\gamma}_{12}(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z_1(x_i) - z_1(x_i + h)][z_2(x_i) - z_2(x_i + h)] \quad (17)$$

gdje je n = broj parova uzoraka varijable z_1 i z_2 na točki x_i , x_{i+h} odvojenih od udaljenosti h .

Unakrsne semivarijance se mogu povećati ili smanjiti s h ovisno o povezanosti između dvije varijable. Cauchy-Schwartz odnos mora biti provjeren da bi se osigurala pozitivna kokriging procjena varijance u svim okolnostima (Burrough i McDonnell, 1998).

3.2. Određeni interpolacijski programi i moduli

Postoje različiti programi i moduli koji se koriste za interpolaciju izmjerenih podataka, u svrhu izrade pravilne kvadratne mreže koja služi za analizu i vizualizaciju (Legendre i Legendre, 1988; Robertson, 2000; Pebesma, 2004; Yang i dr., 2004; Hengel, 2007).

Za interpolaciju, analizu i interpretaciju izmjerenih podataka korišten je alat *Geostatistical Analyst* odnosno napredna ekstenzija *ArcGIS-a* za modeliranje površina. Ova ekstenzija omogućava primjenu dvije skupine interpolacijskih tehnika: 1) determinističke i 2) stohastičke. Nudi alate za prostorno istraživačke analize podataka i geostatistički vodič za stvaranje statistički optimalne površine. Također, povezuje geostatistiku i GIS te omogućuje

utvrđivanje pogrešaka i varijabilnost procijenjenih vrijednosti u izrađenim modelima itd.. Modeliranje pomoću ove ekstenzije uključuje tri koraka: 1) prostorno istraživačke analize podataka, 2) strukturnu analizu (izračun i modeliranje) i 3) površinska predviđanja i ocjenu točnosti izlaznih rezultata.

Osim ovog alata na tržištu su zastupljeni: 1) *QTC CLAMS (CLAssification Mapping Suite)* – softverski paket koji integrira kartografske, vizualizacijske i prezentacijske tehnike. Sadrži različite interpolacijske metode i alate za složenije analize, 2) *SAGA (System For Automated Geoscientific Analyses)* – besplatan GIS softver razvijen u Njemačkoj. Sadrži module za analizu semivariograma i Kriging interpolacijske tehnike, 3) *Surfer* – sadrži interaktivne alate za variogramске analize i nekoliko interpolacijskih metoda. U radu je korišten za izradu trodimenzionalnih grafičkih prikaza, 4) *ILWIS (Integrated Land and Water Information System)* – samostalni integrirani GIS paket razvijen u Nizozemskoj, 5) *MATLAB R* – visoko tehnički razvijeni računalni jezik i interaktivna okolina za razvoj algoritama, vizualizaciju i analizu podataka, 6) *R* – besplatan softver za prostornu statistiku razvijen na Sveučilištu u Aucklandu, 7) *Isatis* – geostatistički alat razvijen od strane Geovariancesa u Francuskoj, 8) *GSLIB (Geostatistical Software LIBrary)* – skup geostatističkih programa razvijen na Sveučilištu Stanford, 9) *S-PLUS* – mogućnost objektno-orijentiranog programiranja, sadrži napredne analitičke algoritme itd.

3.3. Metode usporedbe i procjene kvalitete interpolacijskih metoda

Metodama interpolacije dobivaju se kontinuirani podatci, odnosno model koji omogućuje realan prikaz različitih objekata. Svaka metoda daje različite prikaze, stoga je glavni izazov generirati najtočniju moguću površinu na osnovi uzoraka, te utvrditi karakter pogrešaka i varijabilnost procijenjenih vrijednosti testiranjem i usporedbom različitih metoda interpolacije. Postoji nekoliko sličnih metoda usporedbe metoda interpolacije: metoda unakrsnog vrednovanja (*cross-validation*) (Bishop, 1995; Johnston i dr., 2001; Smith i dr., 2005; Webster i Oliver, 2007), metoda podijeljenih uzoraka (*split sampling*) (Tomczak, 1998; Johnston i dr., 2001; Smith i dr., 2005; Saito, 2009), metoda *jackknifing* (Smith i dr., 2003; Erdogan, 2009) i reziduala (Medved i dr., 2010). Većina autora predlaže metodu unakrsnog vrednovanja (*cross-validation*) za opću ocjenu točnosti određene metode interpolacije (Cressie, 1993; Smith i dr., 2003; Webster i Oliver, 2007; Hofierka i dr., 2007). Za ovu metodu je karakteristično da koristi sve točke za stvaranje i usporedbu modela (Smith i dr., 2003). Najčešći oblik unakrsnog vrednovanja je *leave one technique*. Tehnika prije

interpolacijskog procesa izostavlja jednu točku, za koju se interpolacijom procijenjuje vrijednost. Nakon interpolacijskog procesa izračunava se razlika između predviđene i stvarne vrijednosti izostavljene točke (Tomczak, 1998; Johnston i dr. 2001). Ovaj proces ponavlja se za svaki uzorak (izmjerenu točku). Metoda je pouzdana za površine s dovoljnim brojem reprezentativnih ulaznih točaka (Erdogan, 2009). Koristan je pokazatelj općih karakteristika metoda interpolacije, međutim ne može se koristiti kao mjera dosljednosti korištenog algoritma (Smith i dr., 2003). Metoda podijeljenih uzoraka (*split sampling*) se koristi za procjenu stabilnosti i točnosti interpolacijskog algoritma (Smith i dr. 2005). Karakteristična je po tome što se izmjereni podatci podjele na dva dijela: radne (*training*) i testne (*test*) podatke, gdje je poznat odnos između istih. Testni podatci (slučajni uzorci) služe kao kontrolne točke, dok se radni podatci koriste za izradu modela. Razlike između visina testnih podataka i visina dobivenog modela koriste se kao mjera točnosti određene metode interpolacije.

Konceptualno, identična metoda je *jackknifing* (Lloyd i Atkinson, 2002). Međutim, izlazni rezultati ovise o metodi izdvajanja testnih podataka (slučajnih uzoraka). Ideja ove tehnike je ispitati interpolacijske algoritme, odnosno njihovu dosljednost. Dobri algoritmi su oni koji pokazuju uravnotežene rezultate s obzirom na smanjenje ulaznih visinskih podataka. Najčešće se iz ulaznih visinskih podataka izdvaja 5%, 25% i 50% testnih podataka.

Za razliku od metode unakrsnog vrednovanja, reziduali su razlike između zadanih Z vrijednosti i pripadajućih interpoliranih vrijednosti i računaju se prema formuli $Z_{\text{res}} = Z_{\text{dat}} - Z_{\text{grd}}$, gdje je Z_{res} - vrijednosti reziduala, Z_{dat} - zadane vrijednosti iz ulazne datoteke i Z_{grd} - interpolirane vrijednosti pripadajuće točke (Medved i dr., 2010). Za metodu je karakteristično da je iznos standardne devijacije jednak kao kod metode unakrsnog vrednovanja, dok ostali parametri imaju drugačije vrijednosti.

Najprikladnija metoda interpolacije odabrana je na temelju uspostavljenih 8 parametara (varijabli): minimalna vrijednost, maksimalna vrijednost, doseg, zbroj vrijednosti, srednja vrijednost, varijanca i standardna devijacija. Pomoću ovih parametara ocijenjena je uspješnost svake pojedine metode interpolacije. Svi su parametri kod odabira najprikladnije metode interpolacije važni, međutim ipak treba izdvojiti najčešće korišten parametar standardne devijacije ili srednje kvadratne pogreške. Ona je u svijetu najkorištenija mjera za ocjenjivanje točnosti digitalnih modela (Yang i Hodler, 2000; Aguilar i dr., 2005). Glavna vrijednost ovog parametra leži u jednostavnom konceptu i računanju (Weng, 2006). Matematički se izražava formulom:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{z(x_i) - z(x_j)\}^2} \quad (18)$$

gdje je:

x_i = procijenjena vrijednost na lokaciji i ,

$z(x_i)$ = izmjerena (stvarna) vrijednost na lokaciji i ,

N = broj izmjerenih točaka.

Srednja kvadratna pogreška izražava razinu na kojoj se interpolirane vrijednosti razlikuju od izmjerenih. Temelji se na pretpostavci da su slučajne pogreške u prosjeku 0 te da su normalno distribuirane (Desmet, 1997). U većini radova koji se bave ovom problematikom nije utvrđeno da je srednja kvadratna pogreška 0 (Tomczak, 1998; Hutchinson, 1998; Sheikhhasan, 2006; Soenario i dr., 2010; Svobodova, 2011). Prije razvoja naprednih softvera autori su predlagali da se za prosječnu pogrešku koristi srednja vrijednost (Desmet, 1997; Fisher i Tate, 2006). Danas postoje sofisticirana softverska rješenja s integriranim alatima za prostorno istraživačke analize podataka (*Exploratory Spatial Data Analysis*) i izradu različitih vrsta kartografskih prikaza. Prostorne analize se koriste za procjenu statističkih svojstava podataka te različite oblike manipulacija koje omogućuju uvid s različitih aspekata (Anselin, 1998; 1999). Ovakav oblik analiza koristan je za definiranje distribucije, globalnih i lokalnih trendova, prostorne autokorelacije i varijacije više setova podataka (Shaw i dr., 2009). Alati koji se koriste u ove svrhe su: histogram, QQ plot, analiza trenda i semivariogram/kovarijanca.

Osim analize parametara, interpolacijske metode su uspoređene i vizualno, kroz grafički prikaz podataka (dvodimenzionalno i trodimenzionalno) na osnovi vjerodostojnih grafičkih prikaza skupa podataka. Korištene su i metode usporedbe volumena (korištenjem različitih algoritama) najboljih metoda interpolacije, kao i metoda izračuna i usporedbe profila (Pribičević i dr., 2007; Medved i dr., 2010).

3.4. Metode određivanja veličine ćelije (piksela) DMR-a

Element mreže, popularno poznat kao piksel, predstavlja osnovni prostorni entitet u rasterski orijentiranom GIS-u (Hengel, 2006). Svaki piksel definiran je retkom i stupcem unutar mreže (*grida*) određene veličine. Iako praktički ne postoji razlika između piksela i elementa *grida* (ćelije), znanstvenici koji se bave geoinformatikom smatraju da je piksel vezan za tehnologiju, a *grid* za model (Hengel, 2006). Uz pojmove piksel i element *grida*, često se u literaturi kao istoznačnica koristi pojam prostorna rezolucija (Tankagi, 1996; Takagi i dr., 2002; Bamber i dr., 2009). U početku razvoja aerofotogrametrije, rezolucija se

odnosila na razinu detaljnosti ili najmanji objekt koji se može prepoznati na fotografiji. Za *grid* DMR, rezolucija se odnosi na veličinu piksela, koji aproksimira određenu površinu reljefa i ima specifične dimenzije (npr. 5*5 metara). Manji piksel označava veću prostornu rezoluciju, točnije predstavlja površinu reljefa s više detalja. Određivanje veličine piksela unutar *grida* (mreže) predstavlja središnji problem izrade DMR-a i prostorne analize. Opća ideja je dobiti adekvatan opis i prikaz površine terena sa što je moguće boljom prostornom rezolucijom. Međutim, to ovisi i o svrsi izrađenog modela (Chaplot i dr., 2006). Npr. vrlo visoka rezolucija može rezultirati prikazom površine reljefa koja je mnogo detaljnija nego što je relevantno za postupak nekog modeliranja (Ziadat, 2007). Optimalna veličina piksela je stoga kompromis između točnosti modela koji predstavlja reljef i isplativosti (Hengl i dr., 2003). Odgovarajuća veličina piksela može ovisiti o gustoći prikupljenih podataka (McCullagh, 1988), složenosti terena (vertikalnoj raščlanjenosti) (Chou i dr., 1999; Hengl i dr., 2003; Hengl, 2006) i primjeni (Hengl i dr., 2003; Kienzle, 2004; Chaubey i dr., 2005; Ziadat, 2007; Lin i dr., 2010).

Većina autora ističe da je neprimjereno generiranje DMR-a visoke prostorne rezolucije s oskudnim podacima, jer će se pojaviti problem devalvacije točnosti izvornih podataka (Florinsky, 2002; Albani i dr., 2004).

Iz navedenog je jasno da je veličina piksela direktno vezana za gustoću izmjerenih podataka unutar određenog područja. Stoga je McCullagh (1988) predložio da veličina okvirno mora biti ekvivalent broja izmjerenih točaka unutar određenog područja premjera. Veličina piksela (mreže) se može odrediti sljedećom formulom:

$$p = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (19)$$

gdje je:

n = broj izmjerenih točaka,

A = površina istraživanog područja

Hengl (2006) u svom radu objašnjava nekoliko metoda i algoritama za izračun veličine piksela: kartografsko pravilo (*cartographic rule*), GPS pozicioniranje (*GPS positioning*), veličina razgraničenja (*size of delineations*), kontrola gustoće (*inspection density*), analiza gustoće točaka (*point pattern analysis*), raspon prostorne ovisnosti (*range of spatial dependence*) i kompleksnost terena (*terrain complexity*). Predlaže tri razine prostorne rezolucije: grubu, finu i preporučenu.

Veličina piksela (preporučena) prema metodi kartografskog pravila određuje se prema formuli:

$$p = SN * 0,0005 \quad (20)$$

gdje je:

SN = broj mjerila (*scale number*),

0,0005 = koeficijent izračunat iz minimalne čitljivosti razgraničenja površine u kvadratnim metrima na mjerilu karte koju koristimo.

Primjer: ukoliko za izradu modela koristimo hrvatsku osnovnu kartu mjerila 1:5000, najbolja prostorna rezolucija je 2,5 metara.

Preporučena veličina piksela prema metodi kontrole gustoće određuje se prema formuli:

$$p = 0,0791 \times \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (21)$$

gdje je:

n = broj izmjerenih točaka,

A = površina istraživanog područja,

0,0761 = težinski koeficijent.

Preporučena veličina piksela prema metodi analize gustoće točaka određuje se prema formuli:

$$p = 0,25(0,5) \times \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (22)$$

gdje je:

n = broj izmjerenih točaka

A = površina istraživanog područja

0,25(0,5) = težinski koeficijent koji se odnosi na polovicu ili četvrtinu udaljenosti između izmjerenih točaka.

Preporučena veličina piksela prema metodi kompleksnosti terena određuje se prema formuli:

$$p = \frac{A}{2 \times \sum l} \quad (23)$$

gdje je:

A ukupna površina istraživanog područja

$\sum l$ je ukupna dužina infleksijskih linija

Ovo je formula za digitalni model reljefa izrađen vektorizacijom izohipsi s topografskih karata. U ovom slučaju izohipse se smatraju infleksijskim linijama. Ukoliko se analiziraju infleksijske točke formula je:

$$p \leq \frac{l}{2 \times n(\delta z)} \quad (24)$$

gdje je:

l = dužina linija presjeka (*transect*)

n = broj infleksijskih točaka

3.5. Metode batimetrijskog istraživanja

Batimetrijsko istraživanje je obuhvaćalo širok spektar aktivnosti koje se provode u nekoliko faza: 1) određivanje točnog područja istraživanja, 2) određivanje svrhe batimetrijske izmjere, 3) odabir metoda (tehnika, točnost, horizontalni i vertikalni referentni geodetski sustav, oprema itd.), 4) određivanje vremenskog roka (duži ili kraći), 5) prikupljanje različitih sekundarnih podataka (aero snimke, katastar, vodostaj, salinitet, temperatura itd.), 6) ograničavajući faktori (proračun, logistika itd.), 7) obrada podataka (konvertiranje, filtriranje, metode interpolacije itd.). Batimetrijska mjerenja vršena su integriranim mjernim sustavom koji je uključivao tri glavne sastavnice: dubinomjer *Hydrostar 4300* i GPS uređaje *Ashtech Promark 500* – bazni ili referentni (*base*) i *Thales Z-Max* – pokretni (*rover*). Oni su spojeni preko RTK kontrolera *Juniper System-Allegro* u kojem se putem programskog paketa *FastSurvey* ostvaruje veza i registracija podataka u realnom vremenu.

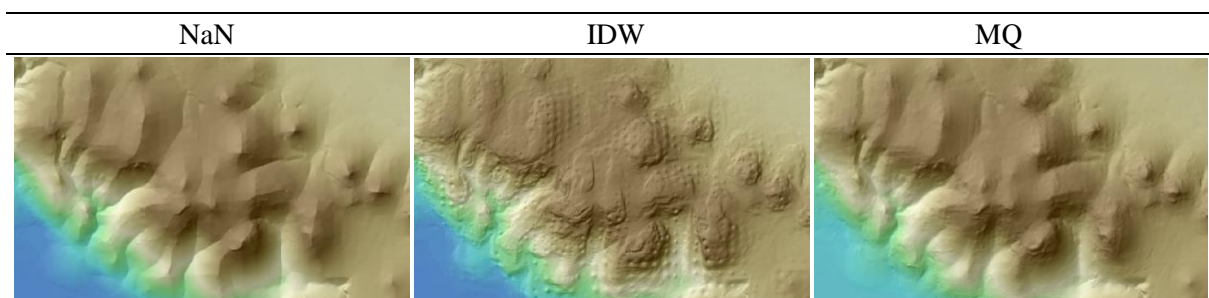
Kvaliteta interpolacijskih metoda analizirana je u 2 faze. U prvoj fazi, za izradu modela jezera i usporedbu metoda interpolacije koristile su se samo točke prikupljene batimetrijskom izmjerom, dok su se u drugoj fazi koristile i točke prikupljene fotogrametrijskom restitucijom.

3.6. Metode vektorizacije

Ručna i poluautomatska vektorizacija izohipsi s HOK-a izvršena je pomoću programa WinTopo. Korišteno je 19 listova HOK-a. Proces vektorizacije uključivao je nekoliko koraka: 1) dodavanje pojedinačnih listova u program, 2) izdvajanje izohipsi u rasterskom obliku, 3) pojačavanje kontrasta, 4) gama korekcije, 5) ručno uklanjanje šumova, 6) popunjavanje nedostajućih piksela unutar izohipsi, 7) odabir metode skeletizacije, 8) spajanje nepovezanih linija, 9) konvertiranje u oblik pogodan za daljnju obradu pomoću GIS programa, 10) topološka obrada, 11) pridodavanje atributa (visina).

3.7. Izrada DMR-a

Za potrebe rada izrađeni su digitalni modeli reljefa iz tri različita skupa visinskih podataka. Prvi je nastao interpolacijom visinskih točaka prikupljenih batimetrijskom izmjerom uz pomoć jednosnopsnog dubinomjera i RTK-GPS (uspoređeno je 16 metoda: 8 determinističkih i 8 geostatističkih). Drugi je izrađen vektorizacijom i interpolacijom izohipsi s postojećih topografskih karata, točnije hrvatske osnovne karte u mjerilu 1:5000 (uspoređene su dvije determinističke metode interpolacije: triangulacijska nepravilna mreža i ANUDEM (*Topo to Raster*)). Treći je dobiven interpolacijom podataka o visinama prikupljenih novom aerofotogrametrijskom izmjerom i stereorestitucijskom obradom (uspoređeno je 17 metoda interpolacije: 9 determinističkih i 8 geostatističkih). Ovakav pristup omogućio je usporedbu DMR-a, kopnenog dijela PP Vransko jezero, te izračun razlike u visinama. Usporedbu treba shvatiti uvjetno jer prostorna rezolucija izrađenih modela nije ista. Ona je rezultat gustoće visinskih točaka, primijenjenih metoda interpolacije, metoda i tehnika prikupljanja te obrade visinskih podataka. Npr. prostorna rezolucija modela izrađenog vektorizacijom i interpolacijom izohipsi (prema metodi kartografskog pravila) iznosi 5 metara s tim da može biti i manja (Hengel, 2006), a modela dobivenog interpolacijom podataka o visinama prikupljenih novom aerofotogrametrijskom izmjerom i stereorestitucijskom obradom 25 metara (DGU, 2003). Razlog je što za izradu DMR-a iz izohipsi ima znatno više visinskih podataka koji su prikazani izohipsama (lomnim točkama unutar izohipsi). Da bi se smanjila rezolucija u modelu, bilo je potrebno napraviti interpolaciju interpolacije (iz visinskih točaka najprije interpolirati izohipse, a zatim iz izohipsi interpolirati rasterski model). „Nasilno“ poboljšavanje prostorne rezolucije u drugom modelu rezultira pojavom tzv. „pruskih šljemova“ (termin se ustalio u literaturi zbog toga što se u izrađenom modelu javljaju „špicevi“ koji podsjećaju na šljemove pruske vojske) (Slika 14).



Sl. 14. Primjer pojave efekta „pruskih šljemova“

4. BATIMETRIJSKO ISTRAŽIVANJE

Hydrografska izmjera obuhvaća proces mjerenja i proučavanja konfiguracije dna oceana, mora, jezera, rijeka i drugih oblika vode na Zemlji (NOAA, 1976). Glavni cilj većine hidrografskih istraživanja je dobiti egzaktno podatke za izradu pomorskih karata s posebnim naglaskom na mogućnosti koje mogu utjecati na sigurnost plovidbe. Ostali ciljevi uključuju dobivanje informacija vezanih za upravljanje i zaštitu obalnim područjem, eksploataciju resursa, znanost, nacionalnu prostornu infrastrukturu podataka, turizam itd. (IHO, 2005). Suvremena batimetrija je, kao grana hidrografije, znanost o određivanju podvodnih dubina, odnosno generalnom utvrđivanju fizičkih značajki dna na temelju analize podatka iz snimljenih profila. Svi podatci o dubinama moraju biti svedeni na razinu referentnog datuma i imati x i y koordinate (predstavljaju položaj mjerenja ili horizontalnu poziciju) i z koordinate (predstavljaju dubinu).

4.1. Metode i tehnike batimetrijske izmjere

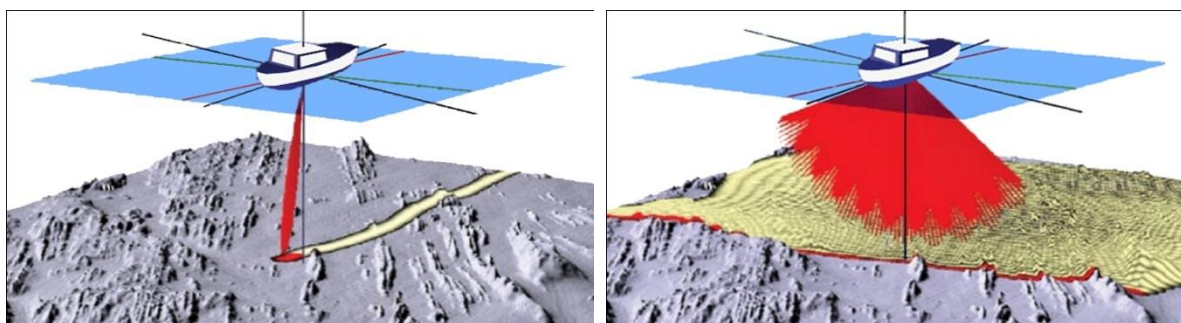
Postoje različite metode i tehnike batimetrijske izmjere koje ovise o kompleksnosti projektnog zadatka (krajnja upotreba i veličina istraživanog područja). One se mogu klasificirati na 3 razine: 1) komercijalni projekti – standard točnosti je najveći, 2) projekt stanja – standard točnosti je srednji i 3) projekt generalnog poznavanja – standard točnosti je najniži (Sciortino, 2010).

Mjerenje dubina može se obaviti pomoću: 1) dubinomjerne motke, 2) dubinomjernog viska, 3) jednostavnog inženjerskog dubinomjera (zapis dubina na papiru) i 4) naprednog inženjerskog dubinomjera (u potpunosti automatizirano). Ovisno o korištenju instrumenata, mjerenje se definira kao direktno ili indirektno (Đapo i Medved, 2003).

Posljednjih nekoliko desetljeća hidrografske izmjere zahvatio je proces snažnih konceptualnih promjena koji započinje od sredine 20. stoljeća pojavom jednosnopnog (*singlebeam*) dubinomjera. Rapidni razvoj se nastavlja izumom višesnopnih (*multibeam*) dubinomjera i laserskih sustava (*airborne laser sounding systems*) koji prikupljaju podatke velike gustoće i omogućuju realističan prikaz reljefa podvodnog dna. Za mjerenje dubina pomoću dubinomjera postavljenog na brod postoje dva osnovna, ali različita načina izmjere (jednosnopni i višesnopni dubinomjer) koji imaju prednosti i nedostatke. Postupak izmjere podataka temelji se na zvučnim (frekvencija do 20 kHz) i ultrazvučnim valovima (frekvencija iznad 20 kHz).

4.1.1. Jednosnopni dubinomjeri

Jednosnopni dubinomjer mjeri jednu vrijednost dubine u jedinici vremena, neposredno ispod broda prema ranije definiranim profilima (Slika 15). Prednost ove tehnologije je niža cijena opreme i lakša obrada izmjerenih podataka. Danas jednosnopni dubinomjeri imaju centimetarsku točnost (IHO, 2005). Glavni nedostatak su dugotrajna mjerenja (ovise o površini i razmaku između profila) i nužnost korištenja interpolacijskih metoda s obzirom na manju gustoću točaka. Na tržištu je zastupljena različita oprema, ovisno o frekvenciji, rezoluciji i sl. Mjerenje jednosnopnim dubinomjerom zadovoljava hidrografske kao i većinu drugih potreba. Unatoč novim tehnologijama jednosnopni dubinomjeri se široko koriste u hidrografskim istraživanjima. Oni se svakodnevno nadograđuju, ovisno o potrebama koje treba ispuniti. Korištenje digitalnih dubinomjera u kombinaciji sa senzorom, satelitskim sustavom za pozicioniranje i softverom za prikupljanje i obradu podatka, optimizira učinkovitost izmjere jer se smanjuje broj osoba potrebnih za različite analize.



Sl. 15. Princip rada jednosnopnog i višesnopnog dubinomjera (preuzeto iz: Kearns i Breman, 2010)

Međutim, treba istaknuti da jednosnopni, za razliku od višesnopnih i laserskih dubinomjera, nisu namijenjeni za snimanje širokog pojasa podvodnog dna. Frekvencija najnovijih JSD se kreće od 12 do 710 kHz npr. EA 600 (Kongsberg, 2012). Prostorna rezolucija batimetrijskih podataka prikupljenih pomoću jednosnopnih dubinomjera ovisi o 3 faktora: karakteristikama senzora, dubini vode i planu profila (Kearns i Breman, 2010).

4.1.2. Višesnopni dubinomjeri

Višesnopni dubinomjeri se brzo razvijaju i imaju veliki potencijal, međutim zahtijevaju poznavanje i korištenje odgovarajućih postupaka u procesu izmjere koji su nužni za pravilno

detektiranje (detaljno poznavanje tehnologije, dugogodišnju praksu, način tumačenja i vrednovanja dobivenih podataka itd.) (MSA, 2004). Prednosti višesnopnih dubinomjera su: mjerenje više vrijednosti dubina u isto vrijeme pokrivajući tako veću površinu, izrada točnog morfološkog modela podvodnog dna bez upotrebe metoda interpolacije (Slika 15). Nedostatci su visoka cijena opreme, zahtjevnija obrada podataka itd. Sve veći broj nacionalnih hidrografskih organizacija prihvatio je ovu tehnologiju kao standardnu metodu prikupljanja batimetrijskih podataka, s ciljem proizvodnje najkvalitetnijih navigacijskih karata koje jamče sigurnost plovidbe (Ernsten i dr., 2006). Višesnopni dubinomjeri koriste se u različitim disciplinama poput podvodne gradnje (Pickrill i Tod, 2003; Caress i dr., 2008.), praćenja ribljih jata (Graham i dr., 2004; Kang, 2011), u podvodnoj arheologiji (Lawrence, 2004), sanaciji divljih odlagališta u moru (Wienberg i dr., 2004) i dr. Istraživanja kvalitete jednosnopnih i višesnopnih dubinomjera najčešće provodi Međunarodna hidrografska organizacija.

Horizontalna točnost jednosnopnih i višesnopnih dubinomjera korištenjem RTK-GPS-a iznosi između ± 20 i ± 30 centimetara, a vertikalna između ± 2 i ± 8 centimetara (Ernsten i dr., 2006; Kaufman i Nemet, 2011.). One ovise prvenstveno o frekvenciji dubinomjera, širini snopa i obliku snopa.

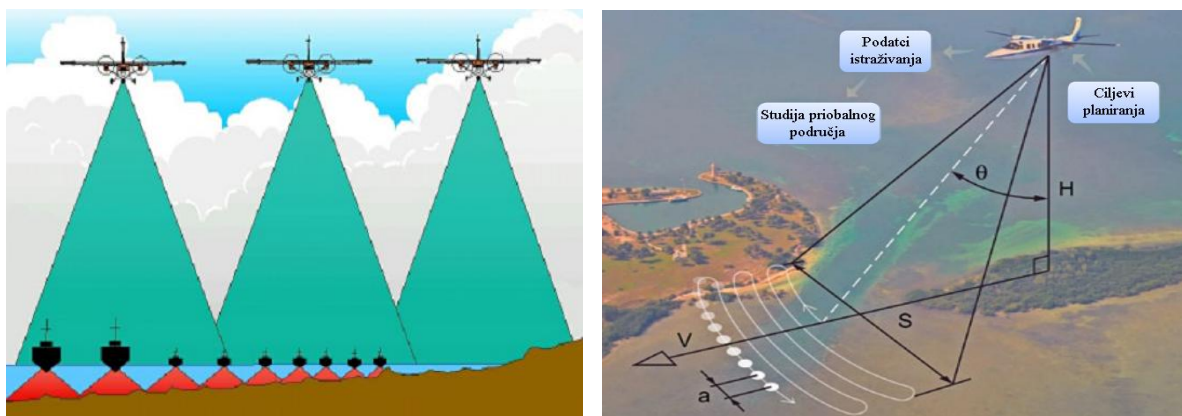
Međutim, treba istaknuti kako se vertikalna i horizontalna točnost, zbog korištenja metoda interpolacije, kod jednosnopnih dubinomjera smanjuje između ± 15 i ± 20 centimetara (Kaufman i Nemet, 2011).

Osim po broju snopova, dubinomjeri se mogu podijeliti i prema: 1) broju frekvencija (jednofrekventne i dvofrekventne) (Galloway i Collins, 1998; Pipal i dr. 2010; Kongsberg, 2012), 2) obliku snopa (uskosnopni i širokosnopni) (Lilja, 2004; Kongsberg, 2012) i 3) broju kanala (jednokanalni i višekanalni) (Kongsberg, 2012).

4.1.3. Zračni laserski dubinomjeri

Laserski dubinomjeri predstavljaju relativno novu tehnologiju koja nudi bržu produktivnost izmjere pomoću skeniranja laserskim zrakama (Guenther i dr., 2000) (Slika 16). Imaju najveću stopu prikupljanja podataka i posebno su prilagođeni za priobalna područja plićih i bistrijih voda. Dubina snimanja iznosi do 70 metara kada su vremenski uvjeti dobri za snimanje (Finkl i dr., 2004). Sustav preko optičkog izolatora proizvodi dva snopa: infra-crveni i zeleni. Infra-crveni snop se emitira okomito ispod uređaja i mjeri udaljenost od zrakoplova do vodene površine. Zeleni snop se emitira pod određenim kutom u odnosu na

infra-crveni i prodire kroz vodu. Dubina vode se izračunava na temelju razlike visinskih vrijednosti između snopova (Slika 16). Podatci se obrađuju specijaliziranim softverima, a tijekom obrade potrebno je uzeti u obzir mnoštvo parametara. Nedostatak laserskih dubinomjera je točnost izmjerenih podataka. Horizontalna se kreće do 15 metara, a vertikalna do 30 cm u područjima do 30 metara dubine (AHS, 2011). Ovu tehnologiju prihvatilo je samo nekoliko nacionalnih hidrografskih organizacija, a glavni je razlog manja preciznost izmjerenih podataka u odnosu na zvučne dubinomjere, visoka cijena opreme i školovanja kadra (Sinclair, 2008).



Sl. 16. Prikaz višesnopnog i laserskog dubinomjera u plitkim vodama (preuzeto iz: Guenther i dr., 2000)

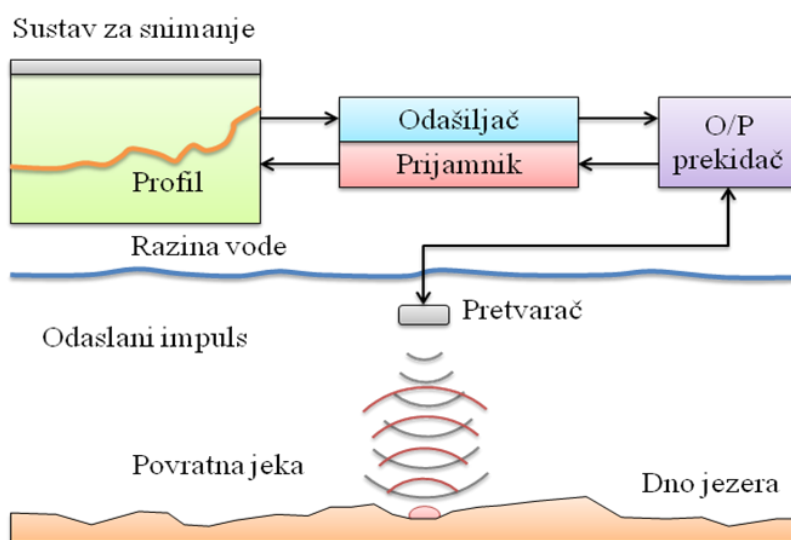
4.2. Princip rada dubinomjera

Utvrđivanje dubina je temeljni zadatak izmjere i zahtjeva specifična znanja poput akustike, poznavanja dubinomjera, senzora, fizikalnih svojstava vode itd.

Većina podataka o različitim geobjektima na površinskom dijelu Zemlje prikupljena je pomoću sustava koji se zasnivaju na korištenju spektra elektromagnetskih valova. Bez obzira što elektromagnetski valovi imaju izvrsnu mogućnost prodiranja i širenja u zraku, oni teško prodiru kroz tekućinu. Drugačije je sa zvučnim valovima koji se lako šire i prodiru kroz tekućinu, međutim njihovo širenje ovisi o amplitudi signala, geometrijskom efektu i apsorpciji koja je povezana sa svojstvima vode (Lurton, 2002; Pribičević i dr., 2007).

Dubinomjer se sastoji od 5 komponenti: 1) odašiljač (*transmitter*), 2) O/P prekidač (*T/R switch*), 3) pretvarač (*transducer*), 4) prijemnik (*receiver*) i 5) sustav za snimanje (*recorder*) (Jong i dr., 2002). Princip rada dubinomjera (Slika 17) je da odašiljač koji stvara impulse šalje preko O/P prekidača elektronski signal pretvaraču koji signal pretvara u zvučni signal te se

kao takav odašilje dalje vodom prema dnu (Jong i dr., 2002; Kearns i Breman, 2010). Dio njegove energije reflektira se povratno u smjeru prijemnika preko O/P prekidača, gdje se zvučni signal ponovo pretvara u elektronski signal, a zatim se u sustavu za snimanje kontrolira i analizira njegovo vremensko zaostajanje (Šljivarić, 2001) (Slika 17). Precizna vremenska razlika između trenutka odašiljanja signala i njegovog prijema predstavlja prijeđeni put zvučnog signala. Da bi se izračunala dubina, potrebno je poznavati osnovne parametre: brzinu zvuka u vodi i frekvenciju odašlanog signala (Šljivarić, 2001).



Sl. 17. Princip rada ultrazvučnog dubinomjera (prema: de Jong i dr., 2002)

Prosječna vrijednost brzine zvuka u vodi iznosi oko 1500 m/s, ukoliko je temperatura 0 °C, salinitet 35 ‰ i tlak 760 mmHg (Ingham, 1992). Raspon korištene frekvencije je različit i ovisi o krajnjoj namjeni izmjerenih podataka. Frekvencija je broj ciklusa koji se izmjeni u jedinici vremena (npr. sekundi), a valna duljina udaljenost između 2 impulsa koji odašiljač emitira u jedinici vremena. Dubina se izračunava prema formuli (USACE, 2002):

$$d = \frac{1}{2} \cdot (v \cdot t) + k + d_r \quad (25)$$

gdje je:

v = prosječna brzina zvuka u vodi,

t = proteklo vrijeme od pretvarača do dna i natrag,

k = konstanta indeksa sustava (određuje se prilikom kalibracije opreme),

d_r = udaljenost od referentne površine vode do pretvarača.

Kada je frekvencija veća, valovi su kraći i učestaliji, a time i osjetljiviji na prepoznavanje manjih objekata. Npr. odašiljač frekvencije 200 kHz prepoznaje objekt od 7,5

milimetara. Mogućnost raspoznavanja objekata na dnu naziva se mjerna rezolucija i može biti vertikalna (određena trajanjem emitirajućeg impulsa) i horizontalna (ovisna o kutnoj širini snopa) (IHO, 2005).

4.3. Plan batimetrijske izmjere

Tijekom batimetrijske izmjere iznimno je važno detaljno planiranje koje omogućava praćenje razvoja i organizaciju izmjere od početka do kraja. Plan izmjere obuhvaćao je širok spektar aktivnosti i sastojao se od nekoliko faza: 1) određivanje točnog područja istraživanja, 2) utvrđivanje svrhe batimetrijske izmjere, 3) primjenu metode izmjere (tehnika, točnost, horizontalni i vertikalni referentni geodetski sustav, oprema itd.), 4) vremenski rok (duži ili kraći), 5) prikupljanje različitih sekundarnih podataka (aero snimke, katastar, vodostaj, salinitet, temperaturu itd.), 6) uzimanje u obzir ograničavajućih faktora (proračun, logistika itd.) i 6) obrada podataka (konvertiranje, filtriranje, metode interpolacije itd.).

4.3.1. Područje premjera

Batimetrijski i geodetski premjer Vranskog jezera rezultat je uspješne suradnje između poslovnih i znanstvenih subjekata. U studenom 2010. godine između predstavnika PP Vransko jezero i Odjela za geografiju Sveučilišta u Zadru preliminarno se raspravljalo o važnosti batimetrijskog premjera. Budući da su komercijalne cijene premjera izrazito visoke, teško je bilo pronaći geodetski ured koji će za ograničen budžet izvršiti zahtjevan premjer. Međutim, nakon opsežnih razgovora i detaljnih uputa o namjeni korištenja izmjerenih podataka, zaključena je suradnja s geodetskim uredom Teodolit iz Zadra. Tvrtka Teodolit je specijalizirana za različite vrste geodetskih i batimetrijskih izmjera, s dugogodišnjim iskustvom rada.

Područje premjera obuhvatilo je cijelo Vransko jezero ukupne površine 29,865 km². Akvatorij Vranskog jezera je specifična i kompleksna cjelina, što je utjecalo na izbor metoda batimetrijske izmjere. Jezero karakteriziraju:

- 1) veliki postotak plitke vode – na preko 65 % površine jezera prosječna izmjerena dubina iznosi -1,76 metara, a najveća -3,73 metra (u odnosu na vodostaj +0,42 vodomjerne letve Prosika)
- 2) slaba vertikalna raščlanjenost – apsolutna visinska razlika na 29,865 km² iznosi svega 3,46 metara. Preko 90 % dna jezera ima nagib do 2 stupnja.

- 3) slaba prozirnost vode, posebice kod pojavljivanja i najslabijih vjetrova;
- 4) prisustvo bujne vegetacije (trave) na dnu i obalnom pojasu (tršćaci i rogozici) u znatnom dijelu jezera;
- 5) velike sezonske oscilacije razine jezera;
- 6) dijelovi dna prekriveni slabo vezanim sedimentima.

Na temelju navedenih karakteristika, složenije i efikasnije tehnike kao što su mjerenje višesnopnim ultrazvučnim dubinomjerom ili laserskim dubinomjerom ne bi bile optimalnije, osobito s obzirom na morfologiju dna. Postotak snimljenog dna bi se znatno uvećao u odnosu na korištenje jednosnopnog dubinomjera, ali drastično bi se povećala cijena premjera i količina podataka koje treba obraditi. Imajući u vidu navedene razloge, zaključeno je da je za batimetrijski premjer ekonomično i efikasno koristiti jednosnopni ultrazvučni dubinomjer.

4.3.2. Svrha premjera

Batimetrijska izmjera Vranskog jezera provedena je iz više razloga: mogućnosti održavanja optimalnog vodnog režima, klasifikacije jezerskog dna, izrade batimetrijske karte, upravljanja i zaštite flore i faune itd. Primarna svrha je izrada batimetrijske karte. Bitno je i ispitivanje mogućnosti za reguliranje i održavanje optimalnog, odnosno planiranog vodnog režima. Taj proces podrazumijeva sve hidrotehničke mjere i građevine kojima se svjesno utječe na promjenu vremenske i prostorne razdiobe vode, što omogućuje svrsihodnije gospodarenje prirodnim vodnim resursima, zaštitu od štetnog djelovanja voda kao i zaštitu voda od onečišćenja (Kuspilić, 2008). Vodni režim uključuje cjelokupnu dinamiku stalnih promjena: kvantitativnih i kvalitativnih osobina vode i dinamiku odnosa voda s okolinom (Kuspilić, 2008). Nesustavno upravljanje vodim režimom uzrokovalo je ekstremno smanjivanje i povećavanje vodostaja, saliniteta, temperature, kisika itd. i zbog toga nedovoljne iskorištenosti jezera s različitih aspekata: turizma, korištenja vodnih resursa, bioraznolikosti, ekologije itd.. To dovelo je do niza negativnih posljedica koje su kulminirale 2012. godine kada se dogodio nezapamćen pomor ribe (URL1).

Optimalan vodni režim može se postići jedino ako je u svakom trenutku poznata količina vode u jezeru i ako kanal Prosika³ ima regulacijsku i zaštitnu vodnu građevinu te

³ Kanal Prosika je odteretni kanal prokopan 1780. godine, čija je dužina 875 m, širina 4 m, a dubina 4-5 m. Krajem 40-tih i početkom 50-tih godina 20. st. izvršena je rekonstrukcija kanala u sklopu koje je prošireno dno s 4 na sadašnjih 8 metara. Na ušću kanala 2009. godine napravljen je betonski prag čime je dno kanala podignuto na 0,8 m.

uređeno korito kroz koje bi se u određenom godišnjem periodu, ovisno o vodostaju, regulirala količina vode.

Na temelju izmjerenih i obrađenih batimetrijskih i drugih podataka trebala bi se napraviti hidrološka i hidrotehnička studija kojom bi se usuglasio prosječan vodostaj, osigurao biološki minimum, osigurao vodnogospodarski minimum i optimizirao vodni sustav (Ožanić, 2002; Kuspilić, 2008). Da bi se odredila zapremina bazena jezera, bilo je neophodno snimiti dno, prikupiti podatke za izradu digitalnog modela reljefa, izraditi topografsku kartu dna jezera i njegovih obala do optimalnog vodostaja i na taj način dobiti kvalitetnu podlogu za daljnije projektiranje.

4.3.3. Korištena oprema

Za batimetrijski premjer korišten je gumenjak *Hondawave* (Slika 18) dužine 3,85 metara, u vlasništvu PP Vransko jezero, koji se zbog manjih dimenzija i gaza, ekonomičnog motora, lake mogućnosti ugrađivanja dubinomjera i ostale infrastrukture pokazao kao optimalno rješenje.



Sl. 18. Korišteni gumenjak *Hondawave* s montiranim drvenim nosačem

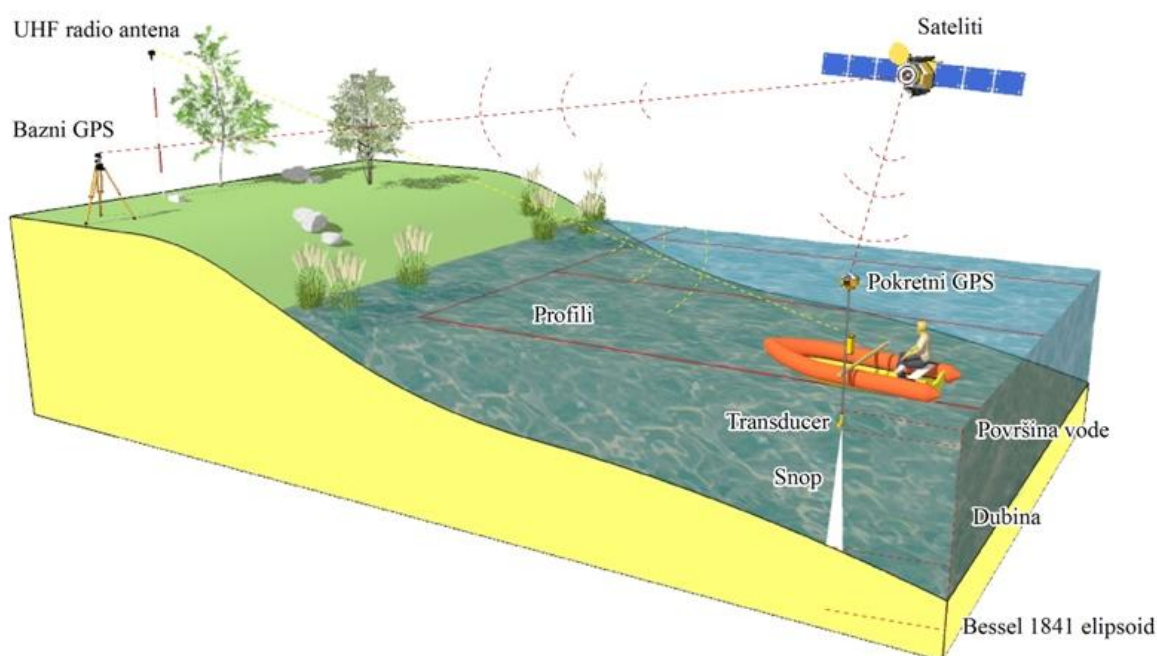
Sl. 19. Pokretni GPS i dvofrekventna sonda

Sl. 20. Bazni GPS i UHF antena

Batimetrijska mjerenja izvršena su integriranim mjernim sustavom (Slika 21) koji je uključivao tri glavne sastavnice: dubinomjer *Hydrostar 4300* (Slika 22) i GPS uređaje *Ashtech Promark 500* (Slika 19) i *Thales Z-Max* (Slika 20). Oni su spojeni preko RTK kontrolora *Juniper System-Allegro* kod kojeg se putem programskog paketa *FastSurvey* ostvaruje veza i registracija podataka u realnom vremenu. Na taj način određuju se koordinate sonde dubinomjera i odgovarajuća dubina. Programski paket automatski preračunava

koordinate GPS-a u koordinate lokalne projekcije. Odabrana projekcija je Univerzalna transverzalna Merkatorova, oblik Gauss-Krüger s centralnim meridijanom 15, faktorom promjene mjerila 0,9999 i lažnim istokom 5500000. Korišten je Bessel 1841 elipsoid.

Uz dubinomjer su korištena dva GPS uređaja: bazni ili referentni (*base*) koji se nalazio na precizno određenim koordinatama i pokretni (*rover*) koji se koristio u radnom prostoru (Slike 19 i 20). Između njih je pomoću UHF radio odašiljača uspostavljena podatkovna veza, koju je moguće izvesti i preko GSM ili drugih uređaja. Udaljenost između bazne i pokretne jedinice mora biti poznata da bi se postigla očekivana razina točnosti. Ona se naziva referentna vrijednost (*base line*) i maksimalno iznosi do 50 kilometara. Udaljenost između baznog GPS i UHF odašiljača mora biti minimalno 10 metara.



Sl. 21. Integralni mjerni sustav – kombinacija GPS-RTK i dubinomjera

S obzirom na loš UHF signal na području jezera, pomoću GPS uređaja *Ashtech Promark 500* uz korištenje CROPOS sustava, određene su tri bazne točke: 1) koordinate $\lambda=5541365,709$, $\varphi=4865017,188$ metara – nadmorska visina 2,02 metra na sjeveroistočnom dijelu Parka prirode (Crkvine), 2) koordinate $\lambda=5543197,353$, $\varphi=4861981,8633$ metara – nadmorska visina 36,69 metara na zapadnom dijelu Parka prirode (Martina draga, Draga), 3) koordinate $\lambda=5548694,214$, $\varphi=4860958,663$ metara – nadmorska visina 62,00 metra na istočnom dijelu Parka prirode (Kamenjak – Torovi – Mernjača). One su bile povezane s reperom i vodomjernom letvom na lokaciji Prosika. Na te točke, ovisno o fazi premjera,

postavljan je bazni GPS uređaj spojen s UHF odašiljačem (sa svim komponentama) kako bi se ostvarila veza (signal) s pokretnim GPS uređajem na gumenjaku.

U svrhu mjerenja izrađen je drveni nosač koji je montiran na sredinu gumenjaka (Slika 18). Zatim je na nosač pričvršćena dvofrekventna sonda s pokretnim GPS-om koja je uronjena 20 centimetara ispod razine vode (Slika 19). Ovakvoj montaži pribjeglo se radi malih dubina i niskog vodostaja u sjeverozapadnom dijelu jezera. Budući da dubinomjer *Hydrostar 4300* podržava istovremeno prikupljanje na dvije frekvencije, za izmjeru su korištene dvije frekvencije: niska – 30 kHz i visoka – 200 kHz.

Batimetrijski premjer je izvršen po unaprijed isplaniranim profilima, koji su iscrtani u softveru AutoCAD na georeferenciranoj kartografskoj podlozi (hrvatska osnovna karta i digitalni ortofoto u mjerilu 1:5000). Osnovni profili mjerenja isplanirani su okomito na nagib reljefa, u smjeru sjeveroistok-jugozapad. Nakon toga unešeni su u kontroler Allegro, koji je omogućio navođenje čamca na linije profila. Planirane linije premjera (osnovni batimetrijski profili) osigurale su odgovarajuću pokrivenost odnosno dovoljno veliku rezoluciju u području premjera. U premjer je bio uključen i manji broj poprečnih profila koji se međusobno presijecaju s glavnim profilima, što je omogućilo usporedbu a time i kontrolu izmjerenih dubina u profilima.

U granicama obalne linije Vranskog jezera, isplanirano je 375 osnovnih linija premjera (profila). Razmak između susjednih profila je postavljen na 200 metara, što odgovara zahtijevanoj rezoluciji premjera za kartiranje u mjerilu 1:30 000.

4.3.3.1. Dubinomjer *Hydrostar 4300*

HYDROSTAR 4300 je jednosnopni dubinomjer posebno dizajniran za batimetrijske izmjere (Slika 22). Izmjereni podatci ispisuju se na termički osjetljivom papiru, uz informacije o datumu, vremenu, geografskom položaju, ali i o drugim informacijama koje su odabrane od strane korisnika. Podatci o dubini također se mogu reproducirati na dodatnom vanjskom zaslonu (npr. računalo) preko serijske veze. Sustav prihvaća podatke o položaju preko navigacijskog sustava i podatke o dubinama preko senzora. Uređaj je jedno/dvofrekventni s vrijednostima frekvencijama 28, 30, 33, 38, 50, 100, 200 ili 210 kHz. Prilagođen je za jednokanalni (200 kHz) i dvokanalni (30, 200 kHz) rad transducera.

Hydrostar sustav uključuje: jedinicu kontrole i prikaza, transducer, jedinicu napajanja, podatkovne kablove i montažu transducera. Jedinica kontrole i prikaza sastoji se od sklopova za napajanje, prijenos i prijem podataka, snimača, tipkovnice i LCD zaslona pomoću kojeg se

unose operativni podatci. On koristi sljedeća sučelja za prijenos podataka: RS 422 ili 232 (priključak x4), RS 232 (priključak x5), RS 422 (priključak x8) i RS 232 ili 422 (priključak x8). *Hydrostar* je 1997. godine certificiran od strane Njemačkog instituta za standard.



Sl. 22. Dubinomjer *Hydrostar 4300*

Razvijen je za mjerenja dubine od minimalno 50 cm do maksimalno 1000 metara što ovisi o odabranoj frekvenciji i vrsti transducera. Kompaktna veličina i mala težina ovog uređaja omogućavaju upotrebu ovog dubinomjera u vrlo malim čamcima. Sofisticirana tehnologija ovog dubinomjera omogućava postavljanje različitih unutrašnjih parametara od koji su neki navedeni u tehničkim karakteristikama.

Transducer ne smije biti postavljen kraj propelera jer turbulencija može uzrokovati pouzdanost izmjerenih podataka. Prilikom postavljanja transducera treba voditi računa o uronjenosti transducera pod vodu, učvršćivanju i položaju transducera.

Tehničke karakteristike dubinomjera *Hydrostar 4300* (Schulze, 2010):

Kućište: aluminijsko

Napon: od 12 do 24 V

Potrošnja energije: oko 30 W

Radna temperatura: od 0 do 50 C

Sigurnosni kod: IP54

Otpor: od 50 do 100 ohma

Duljina impulsa: 0,3; 1; 3 ms

Dubina mjerenja: od 0,5 do 1000 m

Rezolucija: od 10 cm do 1 m

Točnost: $\pm 0,5\%$ dubine

Širina snopa: od 8° do 24°

Veza s računalom: RS422, RS232

Informacije sa zaslona: Digitalna dubina na zaslonu, Serijski izlaz putem NMEA 0183 poruka; Grafički prikaz na termo osjetljivom papiru

Širina/duljina papira: 214 mm; 27 m

Tip snimača: termalni printer s 8 piksela po milimetru

Veličina zaslona: 60 * 32,5 mm

Skala linija: 5, 10, 20 i 50

Draft dubinska korekcije transducera: površina do 9,5 m; kobilica do 4,9 m

Standardne frekvencije: 28, 30, 33, 38, 50, 100, 200 ili 210 kHz

Broj kanala: kombinacija bilo koje dvije frekvencije

Snaga odašiljanja: oko 1000 W

Dimenzije: 47 x 35 x 21 cm

Težina: oko 17 kg

4.3.3.2. Bazni GPS *Z-Max Thales*

Z-Max Thales je sustav koji je dizajniran za izrazito zahtjevne izmjere (Thales Navigation, 2012). Radi se o modularnom sustavu jednostavnom za upotrebu, visoke preciznosti i produktivnosti. Kinematička horizontalna preciznost u realnom vremenu iznosi ± 10 cm, a vertikalna ± 20 cm. Područja primjene ovog uređaja su višestruka. Sastoji se od sljedećih modula: prijemnik, GNSS (*Global Navigation Satellite System*) antena, jedinica napajanja, komunikacijski (podatkovni) prijemnik, V-modul, UHF (*Ultra-high frequency*) antene, terenski priključak, kablovi, specijalizirani metar, mjerne ploče, nastavak za UHF antenu, RF adapter, max RF adapter i SD kartica. Svaki *Z-Max* prijemnik može raditi u CROPOS sustavu, ovisno o verzijama softvera u prijemnicima i *FastSurvey* softvera u kontrolerima. Verzija softvera u *Z-Max* prijemniku mora biti MD05, a u kontroleru *FastSurvey 2.0* ili veća. Da bi *Z-Max* radio u CROPOS mreži potreban je GSM/GPRS modem. Postoje i originalni modemi koji se montiraju na mjesto UHF radio prijemnika. Podatkovna GSM kartica stavlja se direktno u modem te se na taj način izbjegava konekcija putem mobilnog telefona.

4.3.3.3. Kalibracija sustava za prikupljanje podataka

Kalibracija ultrazvučnog dubinomjera je procedura kojom se podešavanju parametri uređaja da bi se osiguralo točno mjerenje dubina. Cilj je da se parametri, a posebice parametar

brzine zvuka postave tako da mehaničke i elektronske komponente dubinomjera budu podešene kako bi dubine bile izmjerene što točnije. Kalibracija dubinomjera može se vršiti na više načina: mjerenjem profila brzine zvuka u stupcu vode, pomoću ček-bara i specijalnog transducera (odabrana metoda). Prosječna temperatura vode prilikom mjerenja iznosila je oko 26 °C, a salinitet 9 ‰. Dubina od 2 metra uzeta je kao uzorak, zbog pretpostavke da najveći dio jezera ima spomenutu dubinu. Na temelju tih parametara je izračunata brzina zvuka prema formuli (Jong i dr., 2002):

$$\begin{aligned}
 c &= 14449.2 + 4.6 * T - 5.5 * 10^{-2} * T^2 & 0 \leq T \leq 35 \\
 &+ 2.9 * 10^{-4} * T^3 + (1.34 - 10^{-2} * T) * (S - 35) & 0 \leq D \leq 1000 \\
 &+ 1.6 * 10^{-2} * D & 0 \leq S \leq 45
 \end{aligned} \tag{26}$$

gdje je:

T=temperatura vode za vrijeme izmjere, S=salinitet i D=dubina.

Vrijednost brzine zvuka iznosila je oko 1508,66 m/s, što je blizu prosječnoj brzini zvuka u vodi.

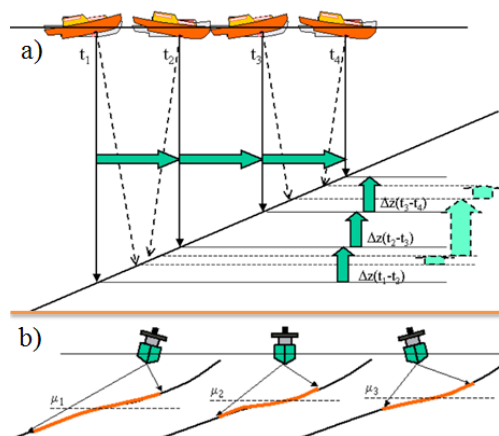
Potrebno je napomenuti da postoji više kompleksnih formula za izračun brzine zvuka u vodi, što rezultira različitim vrijednostima (Medwin, 1975; Chen i Millero, 1977; Mackenzie, 1981; UNESCO, 1981).

Mjerenja na terenu nisu rađena za vrijeme valova tako da nije bilo potrebe da se u sustavu za prikupljanje podataka koristi senzor za praćenje ljuljanja, posrtanja i izdizanja mjerne platforme i njihovu korekciju (*motion sensor unit*). To je doprinijelo dodatnoj točnosti izmjerenih podataka, ali i značajno pojednostavnilo i pojeftinilo premjer i obradu podataka.

Interval registracije podataka u profilu namješten je na 10 m. Međutim, ukoliko bi visinska promjena između dva intervala bila ± 0.5 m uređaj bi zabilježio i taj podatak.

4.4. Vremenski rok

Vremenski rok i dan početka premjera bili su uvjetovani vodostajem, vremenskim uvjetima i obvezama tima. Vodostaj je važan zbog nemogućnosti registriranja dubina transducera u područjima jezera plićim od 0,5 metara. Vremenski uvjeti su bitni zbog mogućnosti plovidbe i kvalitetne registracije podataka (Slika 23). Npr. vjetar, kiša, valovi i hladnoća su ograničavajući faktori. Od preliminarnih dogovora u studenom 2010. godine do premjera, kontinuirano je praćena vremenska prognoza i kretanje vodostaja.

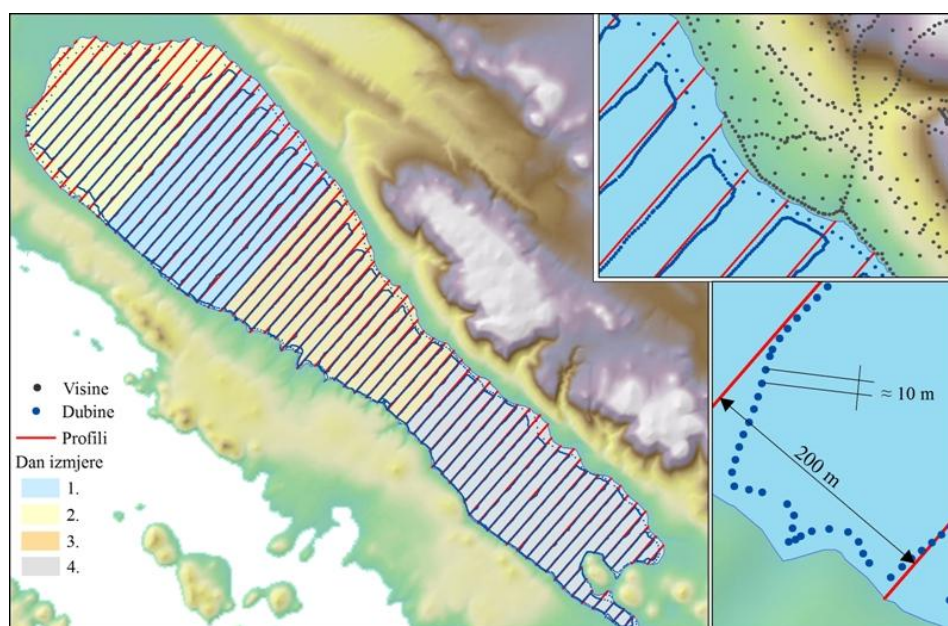


Sl. 23. Utjecaj prednjih (a) i bočnih (b) valova na registraciju podataka (preuzeto iz: Clarce, 2003)

Mjerenja su izvršena u dvije faze (Slika 24): 1) od 10. do 12. svibnja 2012. godine i 2) od 7. do 9. lipnja 2012. godine.

U prvoj fazi, trajala su dva dana, a premjereno je 14,351 km² sjevernog dijela Vranskog jezera. Ukupna dužina premjerenih profila iznosila je 71,3 km, a broj prikupljenih točaka 5643 (prvi dan prikupljeno je 2248, a drugi dan 3395). Vremenski uvjeti bili su idealni za plovidbu i premjer. Visina vodostaja na mjernoj postaji Prosika iznosila je 0,42 cm. Ograničavajući faktori prilikom premjera u ovom dijelu jezera bili su gusta travnata vegetacija na dnu jezera, plićaci, slabo prohodni i neprohodni tršćaci i rogozici. U takvim dijelovima odstupalo se od premjera po unaprijed zadanim profilima, dok su dubine u plićacima mjerene pomoću dubinomjernog viska. Zbog toga se ovaj premjer ne može svrstati pod kategoriju sustavnog premjera. Ipak je vrlo značajan za prikaz dijela terena na kome je izvršen jer je teren ravan ili s minimalnim padom te je moguća i prihvatljiva interpolacija između nepravilno raspoređenih profila.

U drugoj fazi ograničavajući faktori su bili neznatni, tako da se premjer odvijao prema zamišljenom planu. Visina vodostaja na Prosici iznosila je 0,37 cm. Premjereno je 15,514 km² južnog djela jezera. Ukupna dužina premjerenih profila iznosila je 82,5 km, a broj prikupljenih točaka 7208 (treći dan mjerenja prikupljeno je 3582, a četvrti 3626).



Sl. 24. Faze i plan batimetrijske izmjere

4.5. Sekundarni podatci

Dobivanje sekundarnih podataka predstavlja proces koji je uključivao prikupljanje svih podataka koji su neophodni za optimalno planiranje batimetrijske izmjere. DOF i HOK korišteni su kao podloge za iscertavanje okvirne granice jezera i profila. Pomoću izohipsi s HOK-a je analiziran reljef, nakon čega je utvrđen pravac pružanja profila.

Analizom aerofotogrametrijskih podataka dobivenih od DGU posredstvom Parka prirode, uočeno je da linija visokih voda nije jasno utvrđena. Razlog su bujni neprohodni tršćaci koji su predstavljali problem kartografima i onemogućavali kvalitetnu stereorestituciju. Čak ni terenskim radom ne može se pouzdano odrediti granica koja bi reprezentirala određeni vodostaj, jer se granica između vodene i kopnene površine neprestano mijenja. Njeno iscertavanje na podlozi digitalnog ortofota i zadavanje određene visine ovisno o vodostaju, predstavljalo bi subjektivnu procjenu.

Stoga je odlučeno da se linija granice jezera interpolira na temelju podataka o dubinama i visinama okolnog reljefa. Na ovaj način moguće je u softveru zadati određeni vodostaj i tada odrediti površinu jezera i potencijalna poplavljena područja.

Podatci o temperaturi i salinitetu su bitni zbog izračuna brzine zvuka u vodi. Dobivena vrijednost brzine zvuka važan je parametar prilikom kalibracije dubinomjera. Oni su prikupljeni i analizirani na dan izmjere pomoću opreme PP Vransko Jezero.

4.6. Obrada batimetrijskih podataka

Izmjereni podatci su preko kontrolora *Juniper System-Allegro* i programskog paketa *Fast Survey* prebačeni u stolno računalo na daljnju obradu i interpretaciju. Kontroler tijekom mjerenja kreira zasebnu datoteku s informacijama o položaju točke, vremenu u kojem je točka registrirana i dubini točke. Obrada podataka uključivala je filtriranje podataka od šumova, podešavanje provjerenih dubina na zajedničku referentnu razinu i na kraju interpolaciju. Fitiranje podataka napravljeno je pomoću kreiranog programa koji omogućuje uklanjanje grubih grešaka u registraciji podataka (Fabulić, 2012). Dubine su podešene na visinu repera i vodomjerne letve na Prosici ($R=2.0949 - 0$ vodomjerne letve = -0.057).

S obzirom da je Vransko jezero u pojedinim djelovima zahtjevno za premjer, kod mjerenja dubine ultrazvučnim dubinomjerom pojavljivali su se šumovi. Pojednostavljeno rečeno, ultrazvučni snop se odbija od prve prepreke na koju naiđe, dubinomjer određuje udaljenost do te prepreke i prikazuje ga kao dubinu. Ta prepreka često nije željeno dno već

beskoristan šum. To npr. mogu biti različiti materijali u vodi, plankton, riba ispod transducera ili vrhovi vegetacije na dnu (Pribičević i dr., 2007). Sve te šumove potrebno je ili reducirati ili filtrirati da bi se dobili korektni i upotrebljivi podaci. Međutim, potrebno je ukazati na oprez kod filtriranja izmjerenih podataka na području Vranskog jezera. Niska (30 kHz) frekvencija nije mogla prodrijeti kroz izrazito gustu, isprepletenu i „sedimentiranu“ vegetaciju koja je formirala novo čvrsto dno. Zbog toga niska frekvencija nije dala željene rezultate, jer se nije uspjela odrediti debljina mulja ili sedimentirane vegetacije, odnosno granica mulja i stijene. Stoga se, zbog lakše kalibracije dubinomjera, koristila samo prvi dan snimanja. Drugi nedostatak korištenja niske frekvencije su znatni skokovi u profilima, posebice na mjestima gdje bi frekvencija prodrla kroz vegetaciju ili mulj. To dokazuje velike razlike u naslagama mulja. Za detaljnije analize trebalo bi koristiti sedimentirane profile s frekvencijom do 15 kHz, koji služe za dobivanje detaljnih informacija o slojevima dna (Lafferty i dr., 2006; Pribičević i dr., 2007). S obzirom da je jezero plitko i da je vidljivost prilikom snimanja bila dobra, bilo je lako utvrditi karakteristike dna, odnosno razlikovati područja sa i bez vegetacije.

4.6.1. Interpolacija podataka prikupljenih batimetrijskom izmjerom

Da bi se dobile kontinuirane površine koje su neophodne za proučavanje, a time i poznavanje dna Vranskog jezera bilo je potrebno procijeniti vrijednosti na neuzorkovanim područjima koristeći pritom različite interpolacijske metode.

Osnovni ciljevi u ovom poglavlju su sljedeći:

- 1) Usporediti učinkovitost 16 metoda interpolacije
- 2) Odrediti najprikladnije interpolatore za izradu rasterskog modela jezera, na temelju skupa batimetrijski izmjerenih podataka, koristeći pritom metodu unakrsne provjere.
- 3) Izračunati površinu i volumen jezera i usporediti razlike u izračunu između rasterskih modela.

Učinkovitost (kvaliteta) interpolacijskih metoda analizirana je u 2 faze:

U prvoj fazi za izradu modela jezera i usporedbu metoda interpolacije korišteno je 12851 izmjerenih točaka, a u drugoj fazi 30233. Pomoću ekstenzije *Geostatistic Analyst* automatski su optimizirani interpolacijski parametri za svaku od metoda interpolacije koje su prikazane u tablici 1.

Na izlazne rezultate determinističkih metoda utjecala su 4 parametra: eksponent udaljenosti, broj susjeda, udaljenost i broj sektora. Broj susjeda koju su utjecali na točku za koju se procjenjuje vrijednost iznosio je 15. Kod kriterija udaljenosti korištena je kružna zona pretraživanja s definiranim radijusom (udaljenosti). Kod svih metoda osim kod lokalne polinomne radijus je iznosio 3619,9 metara (Tablica 1).

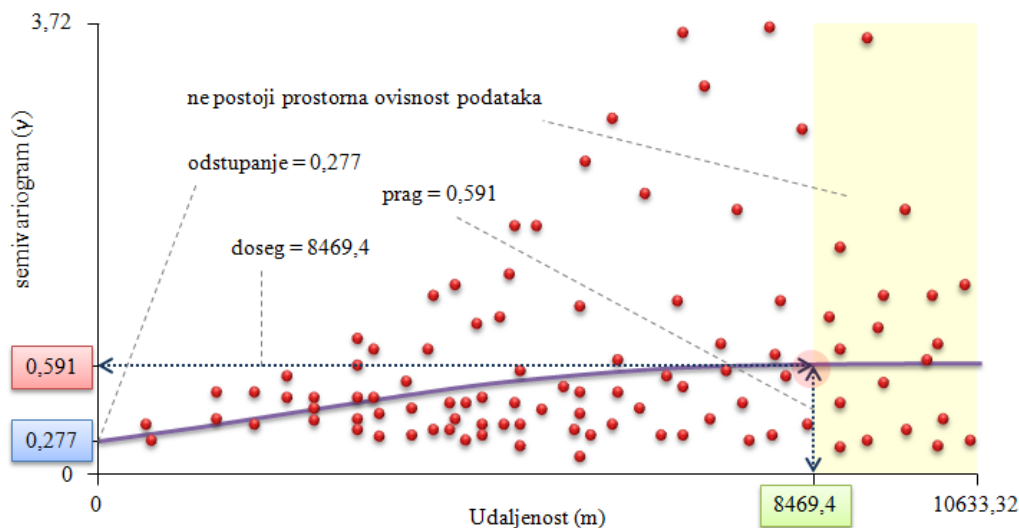
Tablica 1. Parametri metoda interpolacije

MI*	Jačina	Model	Doseg	Prag	Odstu.*	Odmak	Udaljenost	BO*	BS*
IDW	2						3619,9		1
LP	1						228,2		1
CRS	12,3						3619,9		1
SWT	17,7						3619,9		1
MQ	0						3619,9		1
IMQ	0						3619,9		1
OK		Sferni	8496,4	0,591	0,227	886,11	10633,32	12	4
SK		Sferni	2453,1	0,496	0,088	394,96	4739,52	12	4
UK		Sferni	10058,8	0,000	0,031	886,11	10633,32	12	4
DK		Sferni	2395,6	0,767	0,223	388,72	4664,64	12	4
OCK		Sferni	6461,03	0,560	0,191	886,11	10633,32	12	4
SCK		Sferni	2451,89	0,496	0,087	394,88	4738,56	12	4
UCK		Sferni	8496,35	0,000	0,030	886,11	10633,32	12	4
DCK		Sferni	2394,07	0,768	0,221	388,57	4662,84	12	4

*MI – metoda interpolacije, Odst. – odstupanje, BO – broj odmak, BS – broj susjeda, BS – broj sektora

Geostatističke metode su znatno zahtjevnije jer su uključivale modeliranje semivariograma i definiranje parametara unutar njega. Na slici 25 prikazan je eksperimentalni semivariogram za metodu obični kriging, napravljen na temelju 12851 batimetrijski izmjerenih točaka. Podatci su analizirani (uspoređeni) na ukupnoj udaljenosti 10633,32 metra, točnije u 12 klasa s odmakom 866,11 metara, što se pokazalo optimalnijim rješenjem. Odstupanje je iznosilo 0,277 m, što je najvjerojatnije posljedica manje precizne izmjere u pojedinim dijelovima jezera ili varijabilnosti koja se javlja na malim udaljenostima. Doseg je presjekao prag na 8469,4 metra. Krivulja sfernog modela tada prestaje rasti i dolazi do zaravnavanja, nakon čega ne postoji prostorna ovisnost podataka. Eksperimentalni semivariogram integriran je u sferni model koji je odabran iz slijedećih razloga: 1) velike razlike u vrijednostima podataka na malim udaljenostima (udaljenost između izmjerenih točaka po profilima u prosjeku iznosi

oko 10 metara), 2) variogramska krivulja ne raste brzo prema pragu, 3) sferni model doseže vrijednosti praga na horizontalnoj udaljenosti dometa a.



Sl. 25. Semivariogram za metodu obični kriging

Tablica 2. Rezultati za metodu unakrsnog vrednovanja

MI	Broj izmjerenih točaka	Minimalna vrijednost (m)	Maksimalna vrijednost (m)	Doseg (m)	Zbroj vrijednosti (m)	Srednja vrijednost (m)	Varijanca (m ²)	Standardna devijacija (m)
IDW	12851	-1,748	2,265	4,013	-67,424	-0,005	0,062	0,249
LP	12851	-1,702	2,100	3,802	79,836	0,006	0,049	0,222
CRS	12851	-1,702	2,239	3,941	-48,410	-0,004	0,052	0,229
SWT	12851	-1,707	2,234	3,941	-49,528	-0,004	0,052	0,228
MQ	12851	-1,736	2,273	4,009	-23,102	-0,002	0,065	0,255
IMQ	12851	-1,743	2,159	3,902	-68,307	-0,005	0,055	0,234
OK	12851	-1,737	2,030	3,767	19,950	0,002	0,054	0,232
SK	12851	-1,701	2,177	3,877	-8,482	-0,001	0,050	0,223
UK	12851	-1,827	1,948	3,775	51,824	0,004	0,057	0,239
DK	12851	-1,664	2,143	3,807	-3,060	0,000	0,051	0,225
OCK	12851	-1,660	2,060	3,720	11,443	0,000	0,051	0,226
SCK	12851	-1,526	2,007	3,533	-6,873	-0,000	0,038	0,197
UCK	12851	-1,827	1,949	3,776	51,825	0,004	0,057	0,239
DCK	12851	-1,535	2,022	3,557	-6,678	-0,000	0,041	0,203

U prvoj fazi utvrđeno je da su sve metode interpolacije pokazale zadovoljavajuće rezultate, te da su dobre za izradu modela jezera jer imaju slične vrijednosti parametara (Tablica 2). Glavni razlog je mala apsolutna razlika u vrijednosti dubina, slaba raščlanjenost jezerskog dna i minimalan udio područja s naglim skokovima. Raspon vrijednosti standardne devijacije, s obzirom na automatski optimizirane parametre, kretao se od 0,197 do 0,249.

Prema svim parametrima, najbolja se pokazala metoda jednostavni kokriging (0,197). Razlozi su: princip rada metode (μ = poznata stacionirana srednja vrijednost, koja se smatra konstantom za cijelo područje istraživanja i izračunata je iz prosjeka podataka) i maksimalan raspon između vrijednosti dubina (samo -3,46). Srednjak za cijelo područje iznosi -1,763 metra.

Budući da većina autora ističe da kvaliteta stohastičkih metoda ovisi prije svega o odabiru kriterija prilikom izrade semivariograma, napravljena je usporedba kriterija zadanih softverom (automatski) i ručno zadanih kriterija za metodu obični kriging. Testirana su dva česta teoretska modela: sferni i Gaussov (Tablica 3). Poanta ručno zadanih kriterija je pronalazak najmanjeg odstupanja i najniže vrijednosti standardne devijacije. Za sferni model, najmanja vrijednost standardne devijacije je pri udaljenosti 1800 metara (0,221). Za razliku od kriterija optimiziranih softverom, proces ručnog pronalaska najniže vrijednosti standardne devijacije i odstupanja zahtjevniji je i vremenski dugotrajniji (zahtijeva opetovano unošenje parametara interpolacije dok se ne pronađu najniže vrijednosti standardne devijacije).

Iz tablice 3 se može vidjeti da izlazni rezultati standardne devijacije ne pokazuju znatne razlike, npr. kod sfernog modela razlika standardne devijacije između automatski i ručno određenih parametara za 12851 točku iznosi 0,011. Međutim, karakteristično je da je maksimalna pogreška procjene kod istog modela veća za 0,208 metara (2,238).

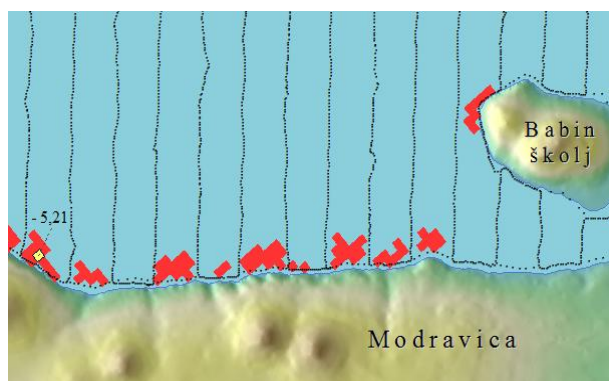
Tablica 3. Usporedba ručno i automatski zadanih parametara za metode interpolacije

Model	Doseg	Prag	Odstu.*	Odmak	Udaljenost	BO*	BS*	SD*	MPP*
Sferni (AZK)	8496,4	0,591	0,227	886,11	10633,32	12	4	0,232	2,030
Sferni (RZK)	1777,9	0,418	0,027	150	1800	12	4	0,221	2,238
Gaussov (AZK)	6337,5	0,477	0,302	886,11	10633,32	12	4	0,238	1,948
Gaussov (RZK)	133,8	0,042	0,048	20	240	12	4	0,220	2,235

*MI – metoda interpolacije, Odst. – odstupanje, BO – broj odnaka, BS – broj susjeda, BS – broj sektora, SD – standardna devijacija, MPP – maksimalna predikcijska pogreška

Malvić (2008) navodi da se smanjivanjem udaljenosti smanjuje i odstupanje, iz razloga što su vrijednosti točaka koje su bliže jedna drugoj sličnije od vrijednosti točaka koje su udaljenije. Smanjenjem odstupanja trebala bi se smanjivati i standardna devijacija izračunata iz razlike izmjerenih i procijenjenih vrijednosti. Međutim, postavlja se pitanje kakva je kvaliteta aproksimacije u drugim dijelovima modela? Testiranjem metode obični kriging došlo se do zaključka da smanjenje udaljenosti pozitivno utječe na standardnu devijaciju, međutim negativno na aproksimaciju u područjima u kojima nisu vršena mjerenja. Dobivene vrijednosti u tim područjima znatno premašuju vrijednosti okolnih izmjerenih točaka. Npr. za

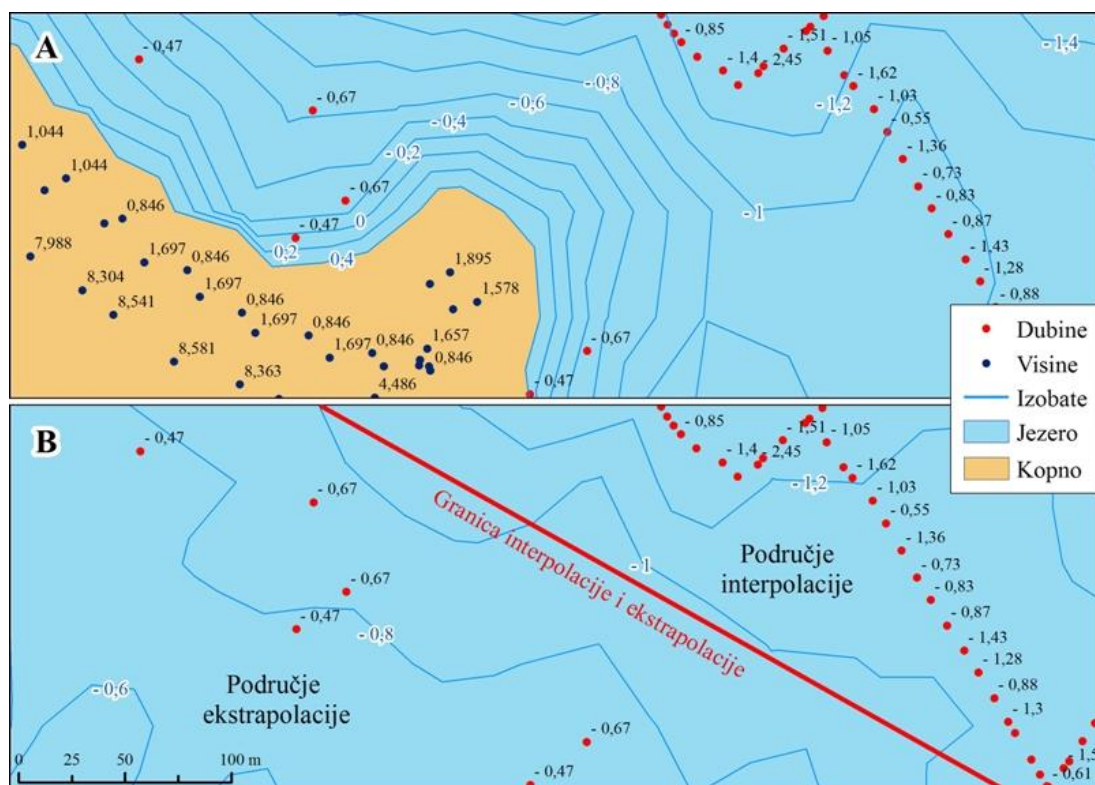
područje Vranskog jezera izrađen je semivariogram u kojem su uspoređene 30233 točke, zadana udaljenost iznosila je 1200 m, a standardna devijacija za 12851 točku 0,298. Za udaljenost 12000 standardna devijacija iznosila je 0,471. Za prvu udaljenost 1200 metara, najniža vrijednost dubine u cijelom modelu bila je -5,39 metara (najniža izmjerena vrijednost je -3,7 m). Čak 0,246 km² površine modela odnosilo se na kategoriju od -3,7 do -5,39 metra (Slika 26). Ovakav rezultat uključuje značajnu grešku koja bi utjecala na povećanje volumena jezera. Za drugu udaljenost (12000 metara) u izrađenom modelu nisu se javljale vrijednosti



preko -3,578. Ovaj primjer dokazuje da standardna devijacija može biti nepouzdan parametar, kada se u obzir uzimaju vrijednosti unutar cijelog modela.

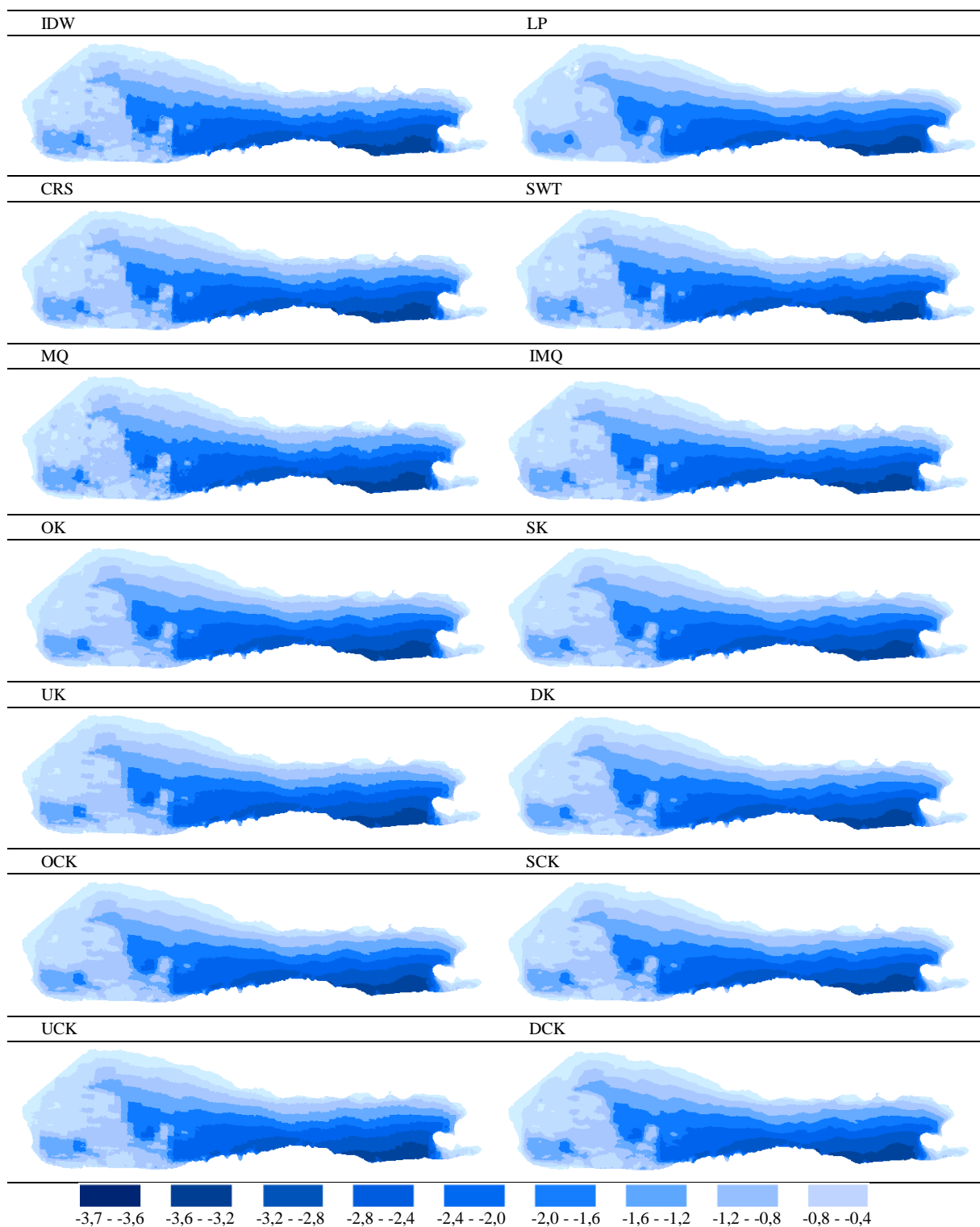
Sl. 26. Prikaz područja u kojima nisu izvršena mjerenja

Točke koje su prikupljene batimetrijskom izmjerom ne obuhvaćaju područje cijelog jezera jer dubinomjer nije mogao prikupiti podatke o dubinama manjim od -0,5 metara. Zbog nedostatka podataka u rubnim dijelovima jezera alat je loše ekstrapolirao površine (Slika 27).



Sl. 27. Primjer interpolacije i ekstrapolacije

Vizualnom usporedbom metoda utvrđeno je da se metode, generalno gledajući, najviše razlikuju po uglačanosti izobata (Slika 28), što je i logično s obzirom da su razlike između odabranih parametara usporedbe interpolacija zanemarive. Detaljnijom vizualnom analizom može se uočiti rezultat pojedine metode (stvaranje kontinuiranih površina na mikro razinama).



Sl. 28. Batimetrijske karte (12851 točka)

Da bi se napravio model jezera koji omogućuje npr. simulacijske prikaze različitih razina vodostaja u obzir je potrebno uzeti i podatke o okolnom reljefu (visinske podatke prikupljene aerofotogrametrijskom izmjerom). Kombinacija precizno izmjerenih podataka o dubinama i visinama omogućila je interpolaciju u područjima u kojima je mogućnost batimetrijske izmjere bila otežana. Izlazni rezultati su se pokazali dobrima s obzirom da su u većem djelu Vranskog jezera obale niske i zaravnjene.

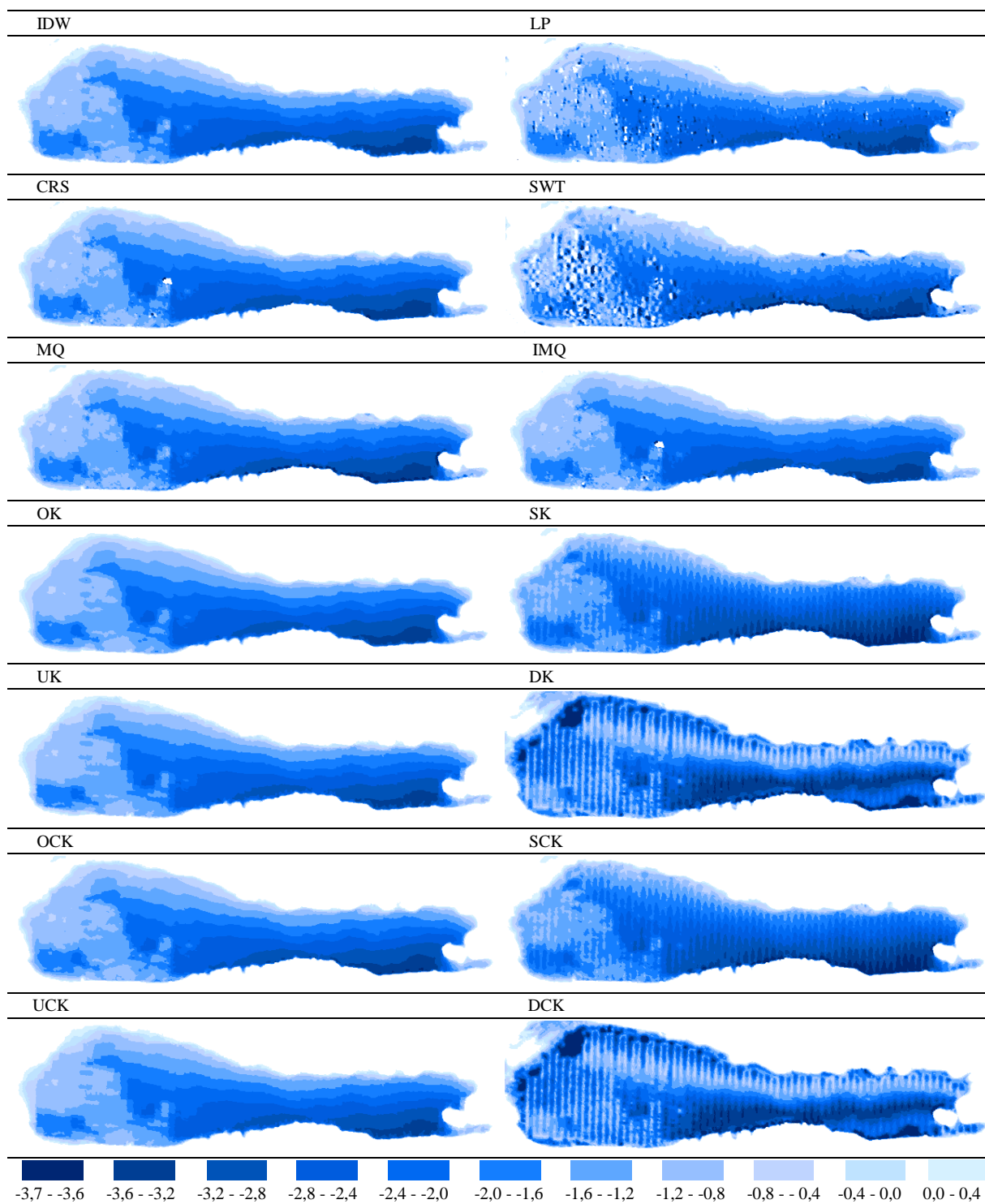
Zbog karakterističnih izlaznih rezultata u prvoj fazi, proces usporedbe metoda interpolacija ponovljen je na 30233 točke unutar PP Vransko jezero (Tablica 4). Od toga, 12851 odnosilo se na dubine (batimetrijski izmjerene točke), a 17832 na visine (visinske točke s x, y, z vrijednostima prikupljene aerofotogrametrijskom izmjerom). Statistički pokazatelji su izračunati samo za batimetrijski izmjerene točke. Izlazni rezultati bili su značajno drugačiji. Korištenje visinskih točaka, koje su nužne za izradu modela jezera i reljefa, ukazalo je na brojne nedostatke većine metoda interpolacija koji su jasno vidljivi u tablici 4 i slici 29.

Tablica 4. Rezultati za metodu unakrsnog vrednovanja

MI	Broj izmjerenih točaka	Minimalna vrijednost (m)	Maksimalna vrijednost (m)	Doseg (m)	Zbroj vrijednosti (m)	Srednja vrijednost (m)	Varijanca (m ²)	Standardna devijacija (m)
IDW	30233	-1,748	4,372	6,120	1169,497	0,091	0,199	0,446
LP	30233	-2,142	4,809	6,951	1793,793	0,140	0,234	0,484
CRS	30233	-117,351	46,197	163,548	487,438	0,038	1,825	1,351
SWT	30233	-4,134	2,881	7,016	60,581	0,005	0,107	0,327
MQ	30233	-1,925	2,618	4,544	360,547	0,028	0,087	0,294
IMQ	30233	-87,722	40,884	128,607	464,898	0,036	1,298	1,139
OK	30233	-1,700	5,551	7,250	1738,313	0,135	0,228	0,478
SK	30233	-1,740	2,363	4,103	186,282	0,014	0,085	0,291
UK	30233	-1,662	10,137	11,799	2329,834	0,181	0,343	0,586
DK	30233	-5,977	4,267	10,245	1828,414	0,142	0,562	0,750
OCK	30233	-1,314	2,280	3,594	543,563	0,042	0,057	0,239
SCK	30233	-1,656	2,338	3,995	211,185	0,016	0,066	0,258
UCK	30233	-1,665	10,136	11,802	2331,259	0,181	0,343	0,586
DCK	30233	-8,972	4,976	13,949	1944,773	0,151	0,570	0,755

Kao najbolja metoda interpolacije, prema svim parametrima kvalitete, pokazala se metoda obični kokriging (Tablica 4). Iz slike 29 jasno se mogu uočiti karakteristike metode jednostavni kriging kada je raspon vrijednosti visina 307,23 metra, jer u tom slučaju srednja vrijednost za cijelo područje iznosi 38,02 metra. Uz obični kokriging, zadovoljavajuće

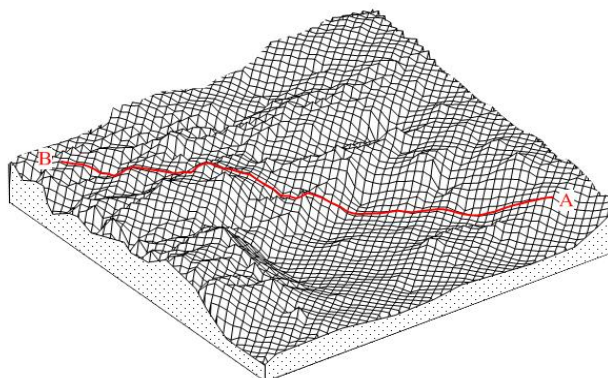
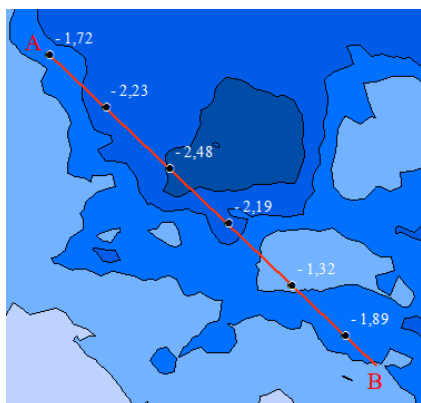
rezultate postigle su metoda inverzne udaljenosti, RBF – multikvadratna i obični kriging. Standardna devijacija za sve tri metode iznosila je manje od 0,5 m.



Sl. 29. Batimetrijske karte (30233 točke)

Razlike između ove četiri metode interpolacije vidljive su na dvodimenzionalnim (Slika 35) i trodimenzionalnim grafičkim prikazima (Slika 34). Slike 30 i 31 prikazuju proizvoljno odabrano raščlanjenije područje jezera, na koje je ucrtan profil (AB) dužine 1500 m, koje je

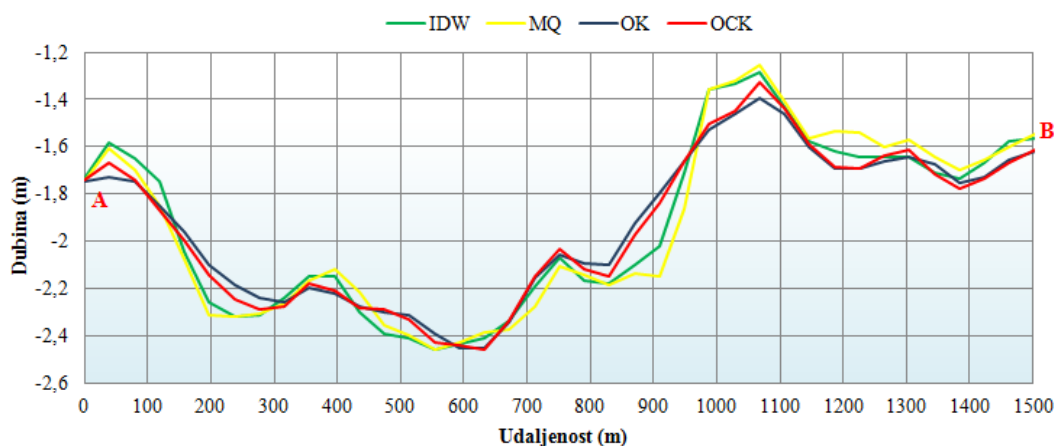
poslužio za daljnje testiranje 4 najbolje metode interpolacije. Profil je ucrtan na način da siječe 6 batimetrijski izmjerenih točaka.



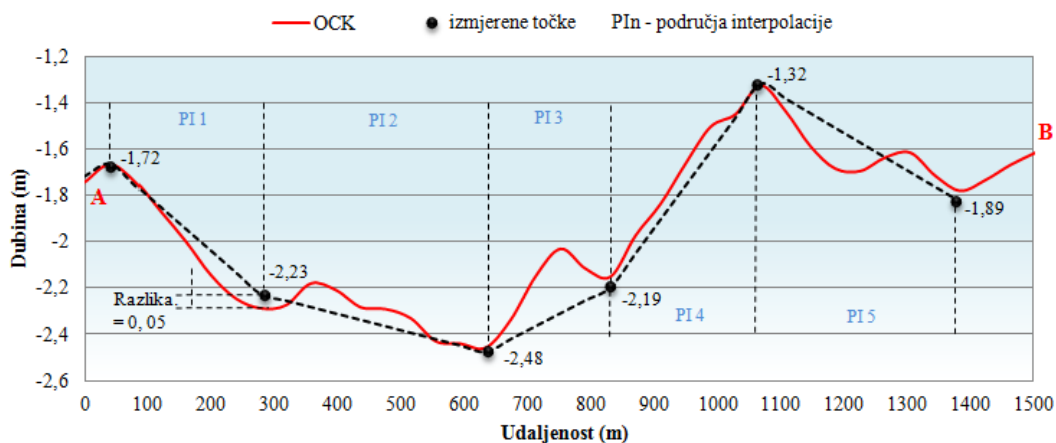
Sl. 30. Prikaz profila na karti sa slojnicama

Sl. 31. Prikaz profila na žičnom trodimenzionalnom modelu

Nakon ucrtavanja trebalo je izračunati presjek za definirane profile na osnovi pravilne mreže dobivene interpolacijom tj. konvertirati dvodimenzionalne profile u 3D linije koje će imati x, y, z vrijednosti.



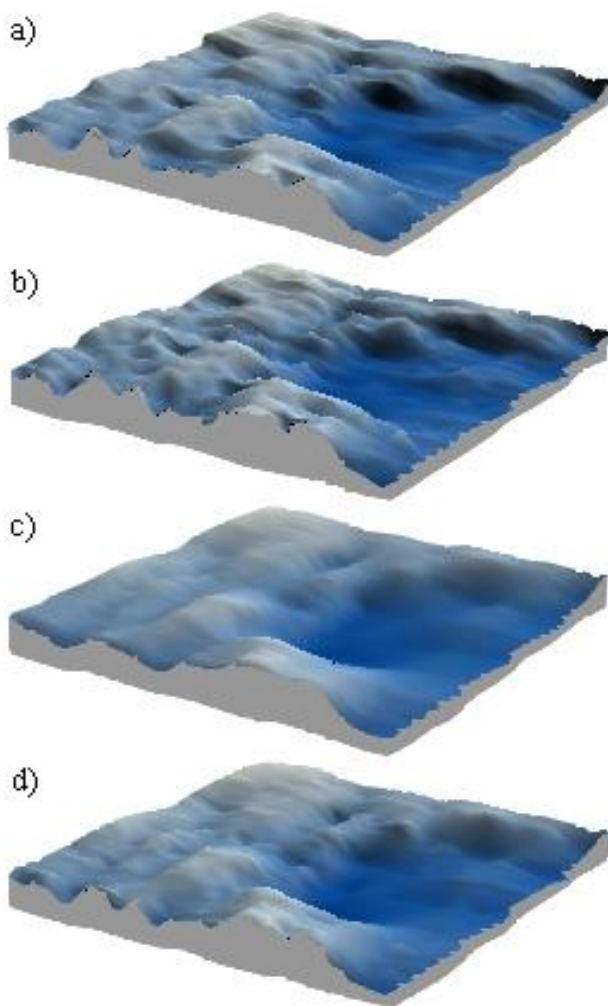
Sl. 32. Razlika profila za 4 najbolje metode interpolacije



Sl. 33. Razlike profila između najbolje metode OCK i izmjerenih točaka u profilu

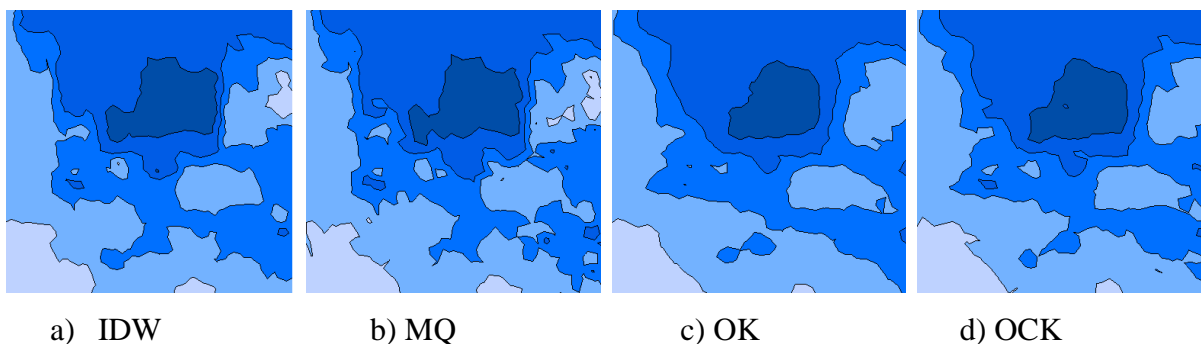
Ovakav pristup omogućio je usporedbu profila, jasan prikaz interpoliranog jezerskog dna i odstupanja između batimetrijski izmjerenih i procijenjenih vrijednosti. Iz slike 32 se može uočiti razlika u načinu interpoliranja između determinističkih (inverzne udaljenosti, ROF – multikvadratne) i geostatističkih (obični kriging, obični kokriging) metoda. Slika 33 prikazuje proces stvaranja krivulje metodom obični kokriging, i njeno odstupanje od izmjerenih točaka povezanih pravocrtnim linijama.

Krajnji rezultat usporedbe metoda interpolacije pomoću ekstenzije *Geostatistical Analyst* je dobivanje pravilne prostorne mreže ili *grida*. Najveći problem za većinu znanstvenika predstavlja odabir prostorne rezolucije ili veličine piksela (Hengel, 2006). U ovom slučaju softver je optimizirao veličinu piksela koja je iznosila 40 metara. Prostorna rezolucija odgovara McCullaghovoj (1988) metodi određivanja veličine piksela. Veličina piksela izračunata je i pomoću *grid calculatora* i metode analize uzoraka točaka (Hengel, 2006). Na temelju 12851 izmjerenih točaka, na površini od 29,865 km², dobivena je prostorna rezolucija od 24,2 metar. Ova metoda nije odabrana iz razloga što je neproporcionalan odnos



između udaljenosti profila i izmjerenih točaka u profilu. Zbog velike gustoće prikupljanja podataka po profilu (10 metara), ali i varijabilnosti (razlika u visini) između susjednih točaka javlja se takozvani problem „pruskih šljemova“. *Grid* je kasnije poslužio kao ulazni podatak za izradu trodimenzionalnih prikaza (Slika 34). Osim toga može se koristiti i za izradu različitih karata koje služe za prikaz slojnica, jezerskog reljefa sjenčanjem, žičnih modela, nagiba, itd. Iz slike 34 je vidljivo da je jezerski reljef kod pojedinih metoda više a kod nekih manje vertikalno raščlanjen.

Sl. 34. Trodimenzionalni prikaz vertikalno raščlanjenijeg dijela dna jezera
a) IDW; b) MQ; c) OK; d) OCK

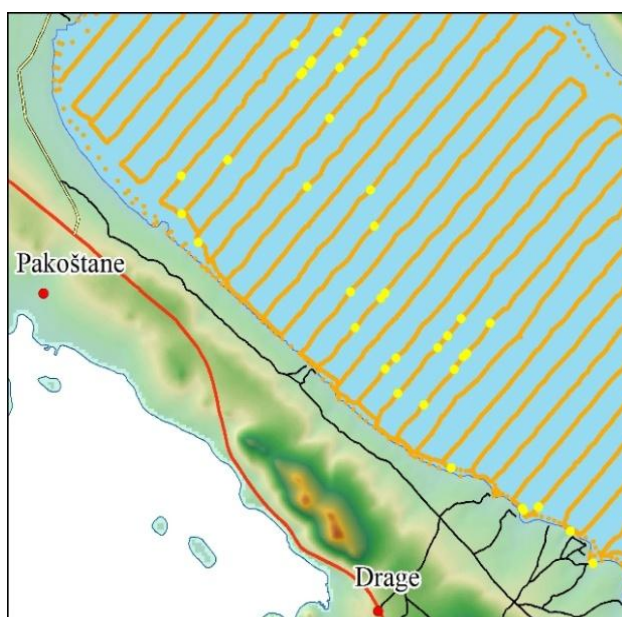


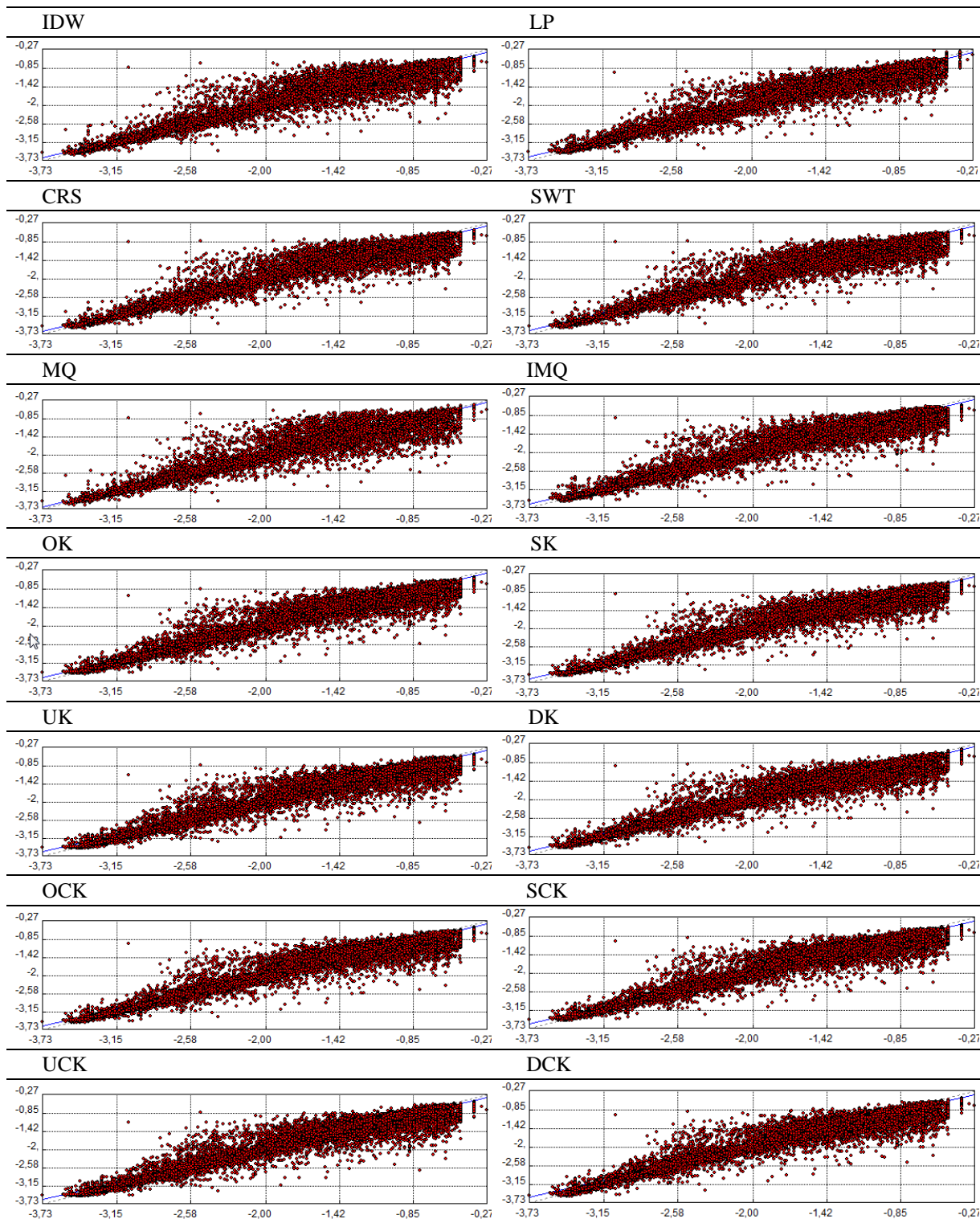
Sl. 35. Prikaz slojnica dijela dna jezera

4.6.2. Predikcijski grafovi

Slika 37 prikazuje 14 grafova koji su dobiveni korištenjem metode unakrsnog vrednovanja. Os x prikazuje izmjerene, a os y procijenjene vrijednosti. Najjednostavnije rečeno, procijenjene vrijednosti su izlazne vrijednosti koje nastaju primjenom interpolacijskih metoda. Razlika između procijenjene i izmjerene vrijednosti naziva se greška. Plava linija se odnosi na tzv. liniju najboljeg rješenja, a isprekidana siva prikazuje odnos 1:1 između izmjerenih i predikcijskih vrijednosti. Dakle, što su crvene točke udaljenije od plave i sive linije to je veća predikcijska pogreška i obrnuto. Pogreške su, generalno gledajući, ravnomjerne za sve metode interpolacije, međutim, detaljnijom analizom jasno se mogu uočiti najbolje metode. Najmanje odstupanje od linije najboljeg rješenja je oko vrijednosti dubina – 3,5, a najveće oko vrijednosti 2,5. Apsolutno najveća predikcijska pogreška za optimalnu metodu interpolacije (obični kokriging) iznosi 2,12 metara. Za istu metodu, 41 izmjerena točka ima predikcijsku pogrešku veću od 1 metra. Prostorno gledajući, one su zastupljene na području sjevernog i sjeverozapadnog dijela jezera gdje dominira travnata vegetacija (Slika 36). Greške na ovom području rezultat su naglih skokova izmjerenih podataka koji su posljedica dinamike reljefa ili neželjenog šuma.

Sl. 36. Područje s najvećim predikcijskim pogreškama (metoda OCK)



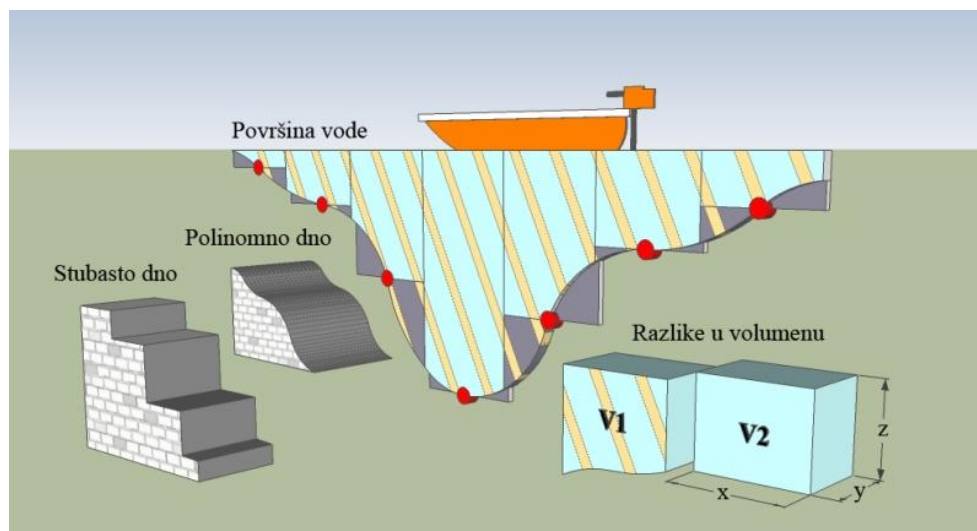


Sl. 37. Pravci regresije izmjerenih (x) i procijenjenih (y) vrijednosti

4.6.3. Površina i volumen jezera

Završna faza procesa batimetrijskog istraživanja je određivanje površine i obujma ili volumena vode u Vranskom jezeru. Volumen se može definirati kao količina vode koja

zauzima određeni prostor između površine i dna jezera izražen u kubičnim jedinicama. Danas se, zahvaljujući modernoj tehnologiji, postupak izračuna volumena maksimalno ubrzao (Diolaiuti i dr., 2005; Ahmed, 2010). Na tržištu su zastupljeni različiti programi koji omogućuju pregledan prikaz svih rezultata te njihovu laku usporedbu. Izlazni rezultati volumena ovise o: metodi prikupljanja podataka, raščlanjenosti dna jezera, gustoći i rasporedu točaka, prostornoj rezoluciji (veličini piksela), algoritmima i metodi interpolacije.



Sl. 38. Primjer stubastog i polinomnog dna

Volumen jezera najjednostavnije se može izračunati pomoću pravilne mreže dobivene određenom metodom interpolacije. Postupak izračuna za područje Vranskog jezera bio je jednostavan s obzirom da je poznat broj piksela (18714), površina ($40 \times 40 = 1600 \text{ m}^2$) i visina (Z) unutar koordinatnog sustava. Piksela u ovom slučaju predstavlja trodimenzionalni objekt (kocku ili kvadratnu prizmu) kojem se može izračunati volumen. Volumen je izračunat pomoću zadane formule:

$$V = P_p * B_p * Z_p \quad (27)$$

gdje je:

P_p = površina piksela,

B_p – broj piksela

Z_p – visina piksela

Radi usporedbe s drugim algoritmima, volumen je izračunat za pravilnu prostornu mrežu dobivenu metodom interpolacije obični kokriging i iznosio je 49783536 m^3 . Ovom metodom postignuti su dobri rezultati s obzirom da razlika između iste i aritmetičke sredine za 3 pravila

(trapezoidno, Simpsonovo i Simpsonovo 3/8) (Tablica 5) iznosi 293143 m³. Izlazni rezultati određivanja volumena pomoću pravilne mreže ovisi prvenstveno o prostornoj rezoluciji; što je ona manja to će izračun biti točniji, jer će i skokovi između piksela biti manji (Slika 38).

Za izračun volumena korištene su i tri kompleksnije Newton-Cotesove formule, integrirane unutar programa *Surfer*: 1) produljeno trapezoidno pravilo, 2) produljeno Simpsonovo 1/3 pravilo te 3) produljeno Simpsonovo 3/8 pravilo (Press i dr., 1988). Newton-Cotesove formule vrlo su korisne i izravne tehnike za aproksimativno izračunavanje integrala uz pomoć numeričkih metoda i algoritama (njihovo korištenje rezultira različitim stupnjem pogrešaka u izračunu) (Medved i dr., 2010). Koriste se za izračun površine i volumena različitih oblika. Simpsonovo pravilo aproksimira integral pomoću Lagrangeovog polinoma koji prolazi kroz tri točke, a trapezoidno pravilo pomoću Lagrangeovog polinoma koji prolazi kroz dvije točke (Palata, 2003). Slika 38 prikazuje jasnu razliku u principima računanja volumena između jednostavnih i kompleksnijih formula.

Tablica 5. Podatci za vrijednost volumena, površinu i opseg jezera pri vodostaju od 0,4 metra

Vodostaj (0,4 m)	Metode interpolacije					
	IDW	MQ	OK	OCK	NaN	TIN
Trapezoidno pravilo (m ³)	49512560	50839235	48904436	50077481	50007961	50108329
Simpsonovo pravilo (m ³)	49523461	50822602	48902952	50070506	50008506	50107823
Simpsonovo 3/8 pravilo (m ³)	49516428	50821012	48906375	50082051	50011883	50105204
Aritmetička sredina (m ³)	49517483	50827616	48904587	50076679	50009450	50107119
Površina jezera (km ²)	29,521	30,009	29,493	29,865	29,897	29,857
Opseg jezera (km)	36,619	36,703	34,290	35,851	35,918	36,118

Tablica 5 prikazuje izračunate vrijednosti volumena dobivene Newton-Cotesovim formulama koje su primijenjene na 5 različitih modela dobivenih različitim metodama interpolacije. S obzirom da svaka od metoda pokazuje određenu pogrešku u procjeni volumena, izračunata je i aritmetička sredina za tri metode.

Granicu jezera u svim modelima predstavlja izobata od 0,4 metra koja je dobivena interpolacijom batimetrijski izmjerenih podataka o dubinama i aerofotogrametrijski prikupljenim podacima o visini reljefa. Izobata je pretvorena u poligon koji je poslužio za izdvajanje rasterskih modela u granicama poligona. U tablici 5 je vidljivo da površina, opseg i

volumen jezera, bez obzira na korištenje istih formula, uvelike ovise o modelima koji su dobiveni različitim metodama interpolacije.

Površina Vranskog jezera prema službenim podacima iznosi 30,2 km² (JUPPV, 2010), međutim nigdje u literaturi se ne navodi kako je površina izračunata, pri kojem vodostaju, koje godine, mjeseca, koje su metode i tehnike korištene itd. Poznato je da se površina jezera neprestano mijenja i da je uvjetovana prvenstveno vodostajem i oblikom okolnog reljefa. U razdoblju od 1948. do 2007. najniži vodostaj bio je 12 cm (0,03 m) 1990. i 2008. godine, najviši 241 cm (2,41 m) 1974. i 1994. godine, a srednji 0,81 m (JUPPVJ, 2010). Na vodostaj, osim glavnih čimbenika (dotoka, otjecanja i isparavanja), bitno utječe vrlo složeno hidrološko-hidraulično djelovanje bilance voda i odnosa razine mora i jezera te morskih mijena i kolebanja morske razine (JUPPVJ, 2010). Godišnje kolebanje vodostaja u promatranom razdoblju na postaji Prosika iznosi 193 cm.

Površina Vranskog jezera s obzirom na vodostaj (godišnje kolebanje 1,93 m) varira gotovo 4 km². Dakle, nije isto ukoliko se mjeri površina Vranskog jezera pri vodostaju od 2,41 metra ili vodostaju od 0,12 metra (Tablica 6).

Tablica 6. Podatci za opseg i površinu jezera pri različitim vodostajima za najprikladniju metodu interpolacije (OCK)

	Vodostaj (m)	Opseg (km)	Površina (km ²)
Maksimalni*	2,41	38,541	33,064
Srednji	0,81	38,338	30,815
Minimalni	0,03	34,974	29,177

*Unutar PP Vransko jezero

Površina se može dobiti ručnom vektorizacijom na temelju georeferenciranog digitalnog ortofota (29,412 km²). Postupak je jednostavan s tim da liniju jezera predstavlja granica između vode i kopna koja je definirana vizualnom subjektivnom procjenom crtača. Međutim, 4,6 % ukupne površine PP Vransko jezero čine tršćaci i rogozici koji se nalaze uz jezero, stoga je granicu jezera jako teško odrediti, jer se površina jezera nalazi i unutar tršćaka. S obzirom na ograničenost spomenute metode, pristupilo se gore navedenim metodama određivanja površine jezera.

Površina jezera iznosi 30,815 km², a određena je na temelju izobate 0,81 m (srednji vodostaj u mjernom razdoblju od 1947. do 2007.), koja je dobivena interpolacijom podataka o visinama okolnog reljefa i dubinama jezera. Metoda određivanja površine jezera interpolacijom pokazala je dobre rezultate jer je većina obale gotovo zaravnjena, ima blage

nagibe i nema naglih skokova između batimetrijski i aerofotogrametrijski izmjerenih podataka. Metoda je provjerena i terenskim radom, korištenjem preciznog GPS-a. GPS uređajem su zabilježene lokacije krajnje granice jezera na 6 nasumično odabranih lokacija. Budući da je interpolirana granica jezera prebačena u GPS, bilo je lako ustanoviti odstupanje.

Prosječna širina jezera iznosi 2201,4 metra (minimalna širina iznosi 262,26, a maksimalna 3469,31 metar). Prosječna dužina uzdužnih profila iznosi 8765,43 m (minimalna dužina iznosi 1843,55, a maksimalna 13245,34 metara). Ove vrijednosti dobivene su analizom 68 poprečnih (sjeveroistok-jugozapad) i 17 uzdužnih (jugoistok-sjeverozapad) profila, s razmakom od 200 metara (vodostaj 0,4 metara).

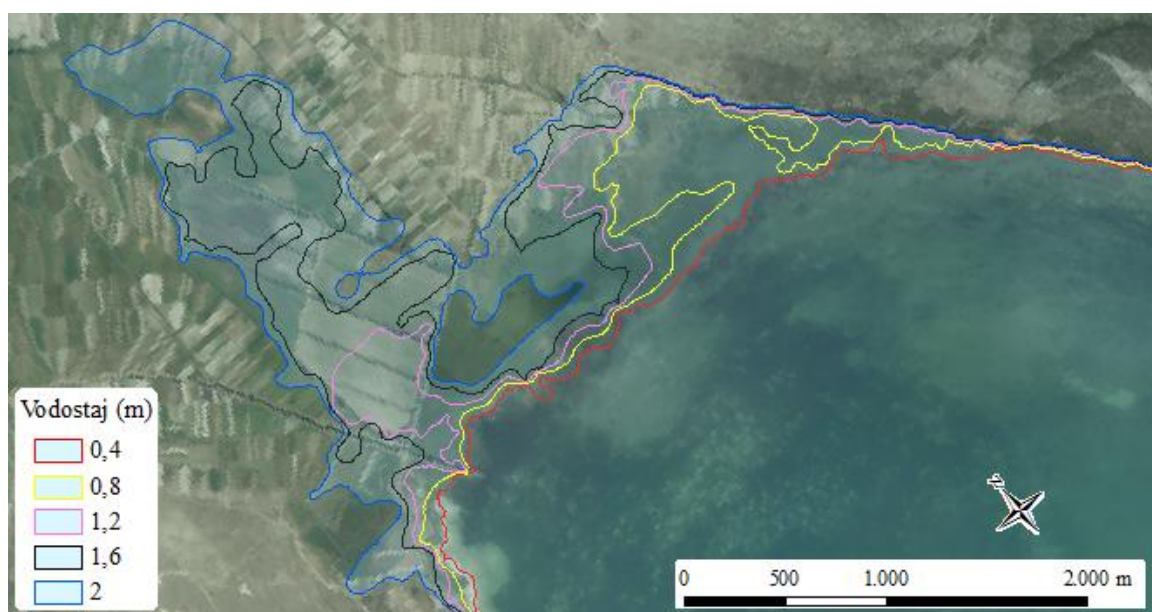
S obzirom da se vodostaj i površina Vranskog jezera tijekom godine neprestano mijenjaju, u radu je vizualizirano godišnje kolebanje vodostaja (u sjevernom dijelu, izvan PP Vransko jezero je napravljen scenarij u slučaju da ne radi crpna stanica Jasen) (Slike 39, 40, 41, 42). Utvrđen je udio poplavljenih površina unutar PP Vransko jezero (staništa (Tablica 7.) i katastarskih čestica) pri vodostaju od 2 metra (Slike 43 i 44).

Tablica 7. Udio poplavljenih staništa pri vodostaju od 2 mnm

NKS_OPIS	Poplavljeno (ha)	Ukupna površina staništa u PP (ha)	Udio (%)
Mozaik složene strukture usjeva	37,8	206,3	18,3
Ilirsko-submediteranske livade riječnih dolina / Sredozemne sitine visokih sitova	32,6	34,9	93,4
Mješovite, rjeđe čiste vazdazelene šume i makija crnike ili oštrike	15,6	696,3	2,2
Dračici	6,6	685,9	1,0
Neobrasle i slabo obrasle obale stajaćica	4,4	6,3	70,9
Ilirsko-submediteranske livade riječnih dolina	2,6	2,6	100,0
Drvoredi na međama kultiviranih površina	2,1	7,2	29,5
Dračici / Termofilne poplavne šikare	1,2	3,5	34,9
Termofilne poplavne šikare	0,6	1,2	50,0
Nasadi alepskog bora	0,6	65,6	0,9
Tirensko-jadranske vapnenačke stijene	0,6	1,0	60,3
Intenzivne komasirane oranice s usjevima monokultura (kulture vlatastih žitarica)	0,6	1,1	52,7
Izgrađena i industrijska staništa	0,5	11,2	4,6

Prikaz vodostaja od 2 metra preklopljen je kartom staništa za PP Vransko jezero u mjerilu 1:5000. Karta je izrađena prema pravilima nacionalne klasifikacije staništa Hrvatske i sastoji se od 30 klasa staništa (Jelaska, 2010). Stanište je, sukladno Zakonu o zaštiti prirode (NN 70/05, 139/08 i 57/11), definirano kao jedinstvena funkcionalna jedinica ekološkog

sustava određena zemljopisnim, biotičkim i abiotičkim svojstvima (URL 2). Naglom promjenom vodostaja mijenja se i ekološki sustav određenih staništa, što utječe na floru i faunu PP Vransko jezero. Analizom je utvrđeno da je gotovo polovica staništa ugrožena poplavom pri vodostaju od 2 metra. Najviše je ugrožena (100%) klasa Ilirsko-submediteranske livade riječnih dolina, a najmanje dračici (1%). Treba naglasiti da se 52,7% površina ugroženih poplavom odnosi na intenzivne komasirane oranice s usjevima monokultura (kulture žitarica), a 18,3% (37,8 ha) na mozaik složene strukture usjeva.



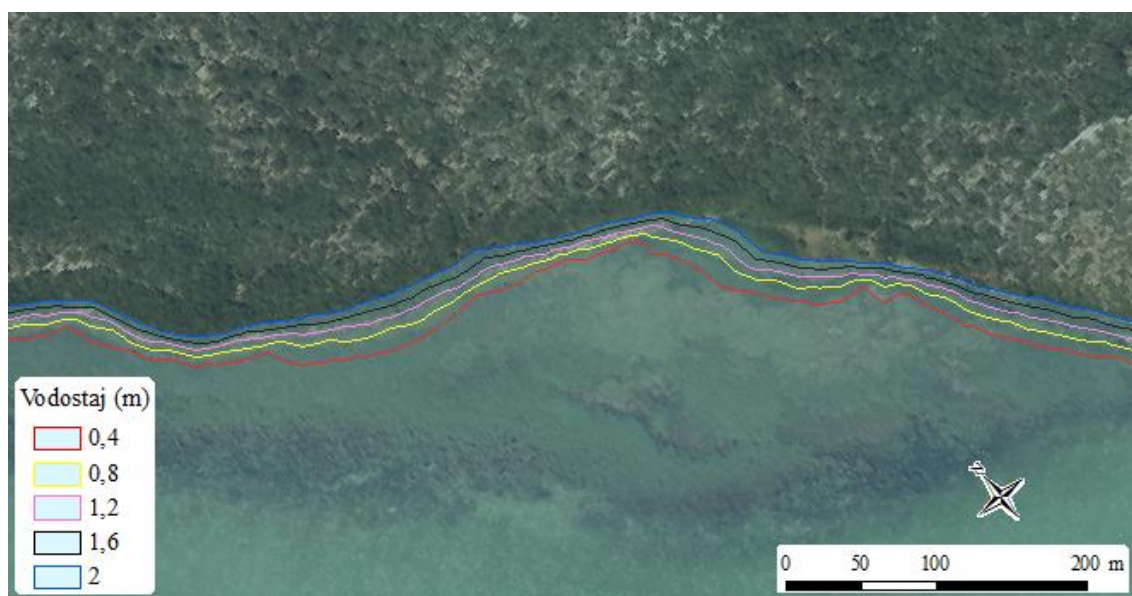
Sl. 39. Godišnje kolebanje vodostaja u sjevernom dijelu PP Vransko jezero (scenarij u slučaju da ne radi crpna stanica Jasen)



Sl. 40. Godišnje kolebanje vodostaja u južnom dijelu PP Vransko jezero



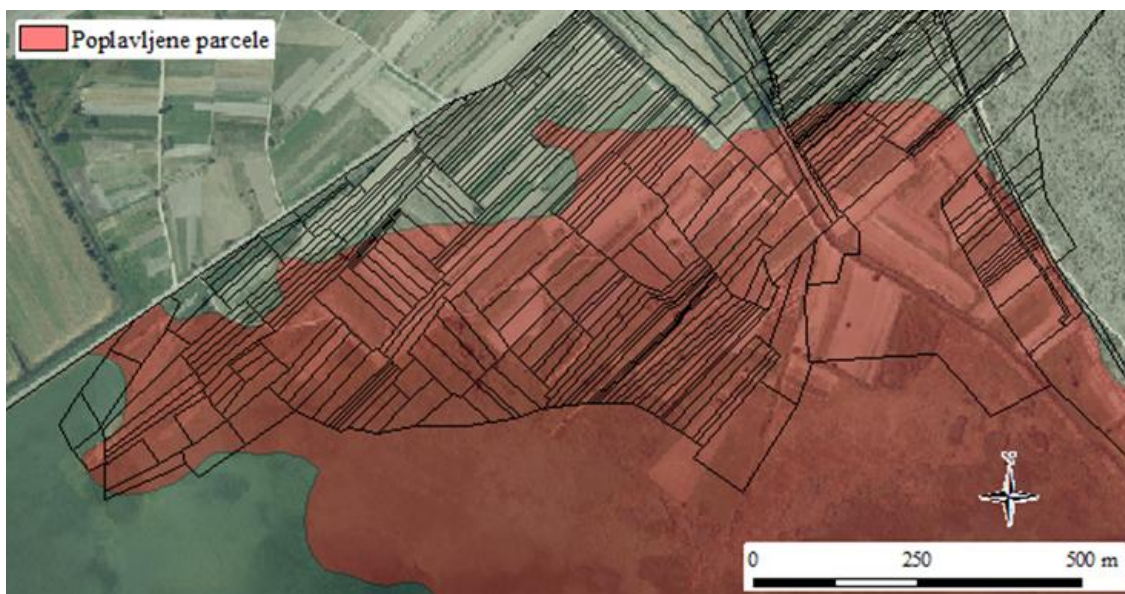
Sl. 41. Godišnje kolebanje vodostaja u zapadnom dijelu PP Vransko jezero



Sl. 42. Godišnje kolebanje vodostaja u istočnom dijelu PP Vransko jezero

PP Vransko jezero podijeljen je između 4 katastarske općine: Pakoštane, Radašinovci, Murter-Betina i Banjevci. Većina obrađivanih poljoprivrednih parcela nalazi se u K.O. Pakoštane. Ukupan broj katastarskih čestica unutar Parka koje pripadaju katastarskoj općini Pakoštane iznosi 1530. Najveći dio koristi se za intenzivnu poljoprivredu. U sjevernom dijelu prevladavaju povrtlarske kulture s nekoliko plodoreda godišnje. Uzgajaju se uglavnom hibridne sorte uz primjenu agrotehničkih mjera za postizanje što boljeg uroda i upotrebu umjetnih gnojiva i kemijskih preparata za zaštitu bilja (JUPPVJ, 2010). U sjeverozapadnom dijelu prevladava mješovita poljoprivredna proizvodnja u kojoj se mozaično izmjenjuju maslinici, vinogradi, povrtlarske kulture i ponegdje uzgoj žitarica (JUPPVJ, 2010). U slučaju

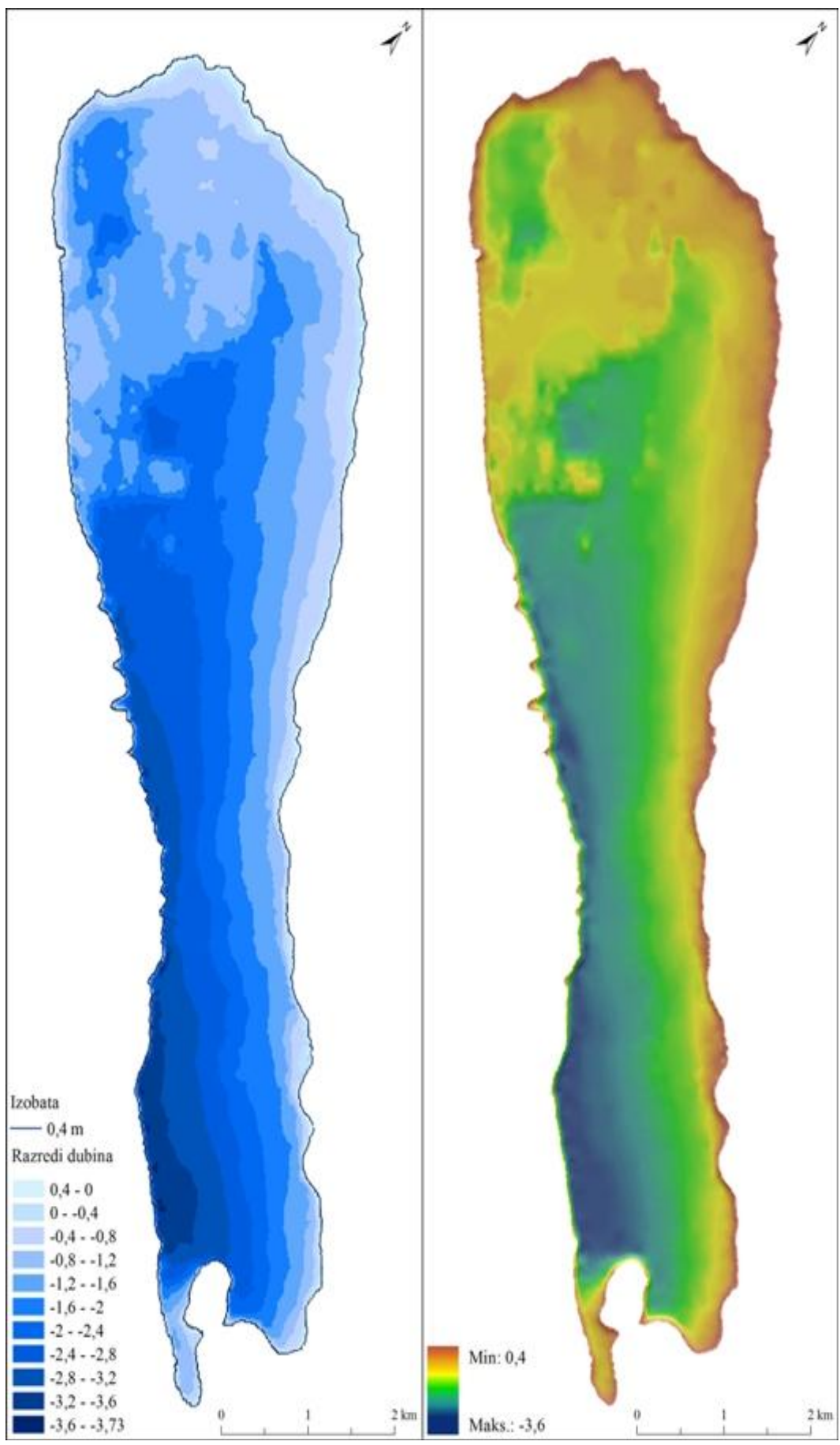
da se vodostaj podigne na dva metra ugroženo je u potpunosti ili djelomično 45,94% (703) katastarskih čestica. U sjevernom dijelu Parka (zaravnjenije područje) u potpunosti je ugroženo 136 k.č., dok su u sjeverozapadnom području K.O. većinom ugroženi niži dijelovi parcela. Da su ova područja u prošlosti bila podložnija poplavama potvrđuje i specifičan oblik poljoprivrednih parcela (posebno u sjeverozapadnom dijelu). Parcele su uske (prosjeak oko 10 metara) i izrazito izdužene (prosječna dužina oko 150 metara). Nagib (pad) parcela (2-5°) okomit je na jezero. Idući oblik poljoprivrednih površina karakterističan je za deltu rijeke Neretve (Glamuzina, 1986).



Sl. 43. Poplavljene poljoprivredne parcele u K.O. Pakoštane pri vodostaju od 2 metra (sjeverni dio parka)



Sl. 44. Poplavljene poljoprivredne parcele u K.O. Pakoštane pri vodostaju od 2 metra (sjeverozapadni dio Parka)



Sl. 45. Batimetrijska karta Vranskog jezera

5. IZRADA DMR-A IZ PODATAKA DOBIVENIH VEKTORIZACIJOM IZOHIPSI

Izohipse na HOK-a su interpolirali stručnjaci za stereorestituciju koristeći pritom metode i tehnike koje su bile dostupne u vrijeme izrade karata. Bez obzira što su podatci prikupljeni i obrađeni novijim fotogrametrijskim metodama, geodetski gledano, položajno i visinski „točniji“ (karte najprije skenirane, a zatim georeferencirane.), za analize reljefa PP Vransko jezero može se koristiti i model izrađen vektorizacijom i interpolacijom izohipsi s HOK-a. Razlozi su sljedeći: 1) manja prostorna rezolucija omogućava realni prikaz naglih promjena visina, za razliku od rezolucije od 25 metara koju preporuča DGU (2003), a koja zaglađuje površine i često zanemaruje važne detalje reljefa; 2) za određivanje visina korištene su aerofotogrametrijske metode i metode detaljnog nivelmana (milimetarska točnost); 3) izohipse su ručno interpolirane; 4) iz izrađenog modela jasno se vidi da je aproksimacija realna.

5.1. Točnost HOK-a

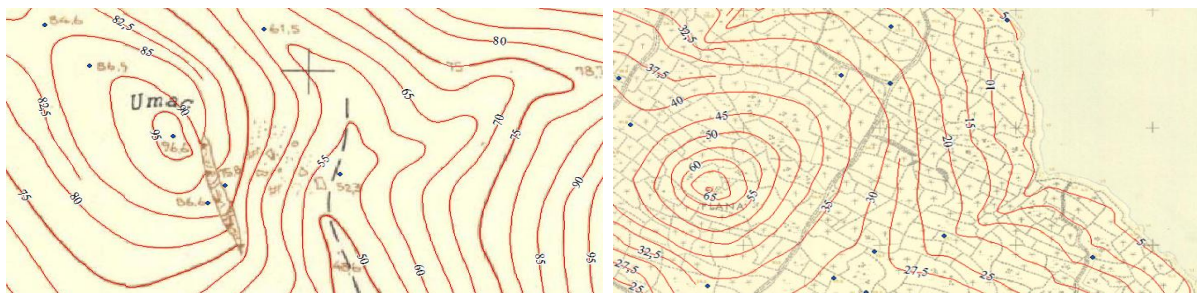
Od I. svjetskog rata kartografska je djelatnost bila vezana uz vojne ustanove izvan Hrvatske. Sva izdanja topografskih karata (osim ODK 1:5000) izrađena su u VGI-u u Beogradu, gdje se nalaze izdavački i reprodukcijски izvornici, dok je u Republici Hrvatskoj ostao samo određeni broj otisaka tih karata (Horvat i dr., 2003). Šezdesetih godina u Hrvatskoj je započela izrada topografskih karta mjerila 1:5000, najprije kombinacijom aerofotogrametrijske metode i detaljnog nivelmana, a kasnije isključivo aerofotogrametrijskom metodom (Frangeš, 2003). Izvorni listovi ove karte izrađeni su na crtaćim folijama. Potrebno je istaknuti da su ovi kartografski proizvodi temeljeni na visokim suvremenim znanstvenim i stručnim načelima, te da je njihova kakvoća u stručno-tehničkom pogledu neprijeporna (Biljecki i dr., 1995). S ciljem dobivanja barem djelomičnog uvida u točnost karte 1:5000, izrađena je „Studija o nadomještanju reprodukcijских izvornika i obnavljanju sadržaja topografskih zemljovida“ (Biljecki i dr., 1995). Ispitana je točnost koordinatne mreže i geodetske osnove na nekoliko listova karte 1:5000. Srednja kvadratna pogreška koordinatne mreže iznosi oko ± 0.7 m, dok se srednja kvadratna pogreška geodetske osnove kreće između ± 0.58 m do ± 1.50 m. Točnost zemljovida izravno je ovisna o točnosti fotogrametrijske restitucije. Točnost aerotriangulacije je $4 \mu\text{m} = \pm 0.12$ m. Točnost restitucije linijskih i točkastih elemenata na analitičkim stereoinstrumentima je $10 \mu\text{m} = \pm 0.30$ m. Maksimalna pogreška cca ± 1 m (Biljecki i dr., 1995).

5.2. Vektorizacija izohipsi

Vrijednosti visina koje su potrebne za izradu DMR-a PP Vransko jezero dobivene su vektorizacijom izohipsi s hrvatskih osnovnih karata u mjerilu 1:5000. Izohipse na digitalnim rasterskim kartama predstavljaju linije koje spajaju područja istih visina s ekvidistancom od 5 metara. Prije procesa vektorizacije, izohipse u rasterskom obliku mogu imati gotovo beskonačan broj visinskih točaka. Međutim, procesom vektorizacije definira se broj lomnih (visinskih) točaka unutar svake linije, koji ovisi o odabranoj metodi. Vektorizacija je postupak pretvaranja rasterskog oblika podataka u vektorski. Ona može biti ručna, poluautomatska i automatska. Ručna vektorizacija je fizički najzahtjevnija jer uključuje tri aktivnosti: pripremu izvornika, vođenje pokazivača po ranije definiranim objektima i u konačnici pridodavanje atributa. Automatska vektorizacija podrazumijeva automatsko odvijanje cjelokupnog procesa vektorizacije, koje se temelji na različitim algoritmima detektiranja i prepoznavanja rasterskog sadržaja (Cetl i Tutić, 2002). S obzirom da je automatska vektorizacija izohipsi iz HOK-a gotovo nemoguća zbog loše rezolucije karata, brojnih sadržaja (prometnica, toponima, suhozida, vodenih tokova itd.) u radu je korištena ručna i poluautomatska vektorizacija. Kod poluautomatske vektorizacije linija se automatski vektorizira do prve zapreke, npr. križanja s drugom linijom, nakon čega operater mora ručno prevesti kursor preko križanja na liniju koja se vektorizira (Frančula, 2004).

Poluautomatska vektorizacija je izvršena pomoću programa *WinTopo*. Korišteno je 19 listova HOK-a. Proces vektorizacije uključivao je nekoliko koraka: 1) dodavanje listova u program (pojedinačno), 2) izdvajanje izohipsi u rasterskom obliku (uzorkovanje boja) – izohipse su prikazane svjetlijim i tamnijim nijansama oker boje, 3) pojačavanje kontrasta, 4) gama korekcije, 5) ručno uklanjanje šumova koji se najčešće javljaju u postupku skeniranja, npr. kad se linije sijeku pod malim kutom – tzv. premoštavanje (Frančula, 2001), 6) popunjavanje nedostajućih piksela unutar izohipsi, 7) odabir metode skeletizacije – odabrana je metoda najbolje kombinacije (kombinira dvije metode Zhang/Suen i Stentiford) s faktorom uglašavanja linija 25 i faktorom reduciranja 5, 8) spajanje nepovezanih linija – nakon automatske vektorizacije javljaju se brojne pogreške koje je potrebno otkloniti (mnoge linije su krivo spojene, pa ih se trebalo prekidati i spajati s odgovarajućim), 9) konvertiranje u oblik pogodan za daljnju obradu pomoću GIS programa, 10) topološka obrada – preko alata *Topology* zadano je nekoliko topoloških pravila (da se linije ne smiju preklapati same sa sobom ali i s drugim linijama, moraju biti spojene tamo gdje postoji kontinuitet), a sve u svrhu dobivanja kvalitetnijih izlaznih

podataka i 11) pridodavanje atributa (visina) – da bi se izbjegle potencijalne pogreške koje se mogu pojaviti kod ručnog pridodavanja vrijednosti visina u atributne tablice, konstruirana je pravilna mreža 500*500 metara. Ona je poslužila za sustavni nadzor vrijednosti, na način da je svaki od 228 kvadrata pojedinačno provjeren. Na slici 46 je prikazan primjer poluautomatske i ručne vektorizacije izohipsi.

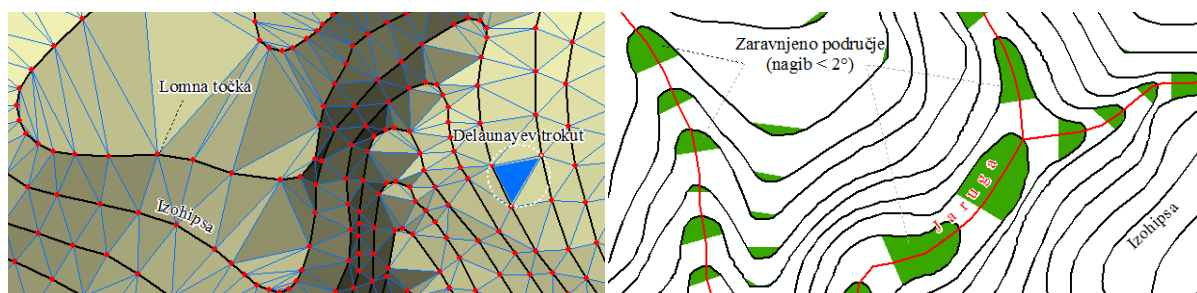


Sl. 46. Primjer poluautomatske (lijevo) i ručne (desno) vektorizacije izohipsi

Pri vektorizaciji linijskih elemenata cilj je vektorizirati središnju liniju ili os. Nakon procesa skeniranja linijski element definiran je s više piksela, stoga je potrebno reducirati debljinu pri čemu moraju biti zadovoljena dva kriterija: linija mora imati debljinu jednog piksela i novi prikaz mora odgovarati obliku originalne linije (Cetl i Tutić, 2002). Taj se postupak naziva transformacija srednje osi (*Medial Axis Transform*) ili skeletizacija (Illert, 1992). Statistički gledano, za šire područje PP Vransko jezero ukupna dužina izvektoriziranih izohipsi iznosila je 1016,429 km (ukupno 159784 lomnih točaka) i 1357 visinskih točaka. DMR je izgrađen na temelju 161141 visinskih točaka.

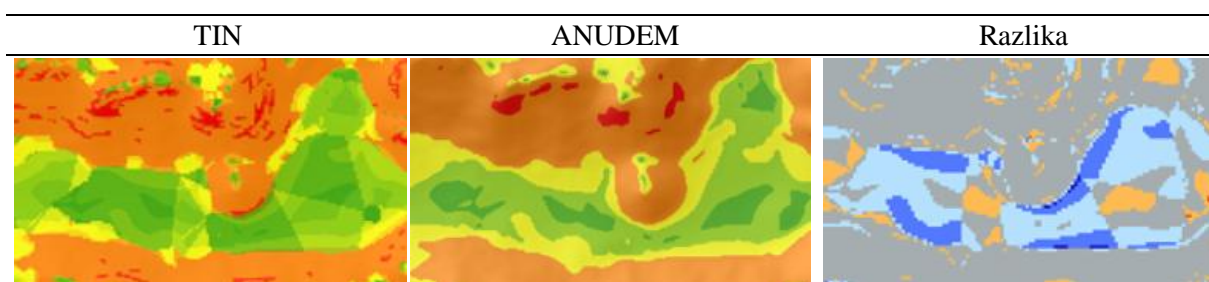
5.3. Interpolacija izohipsi

Dobivene izohipse i visinske točke poslužile su za izradu DMR-a korištenjem dvije metode interpolacije: TIN i ANUDEM. Za metodu TIN korišteni slojevi su izohipse i visinske točke. Prilikom interpolacije TIN metodom koriste se lomne točke unutar izohipsi i povezuju se trokutima na temelju Delaunayevog pravila triangulacije (Slika 47).

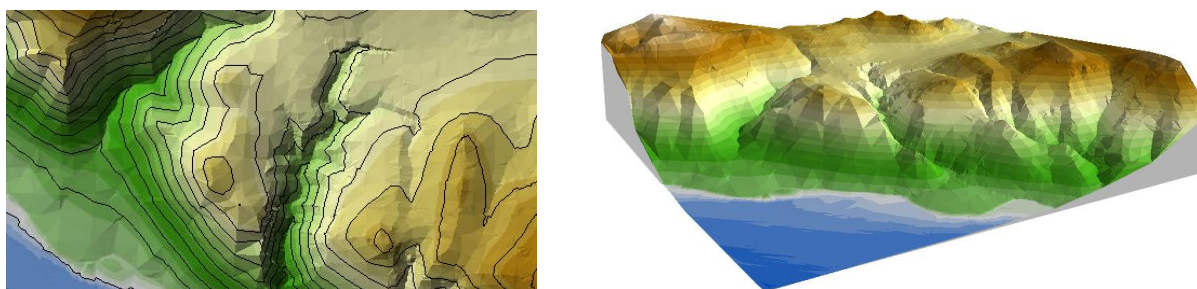


Sl. 47. Princip Delaunayeva triangulacije na primjeru lomnih točaka

Za izradu modela pomoću ANUDEM metode korišteno je 5 slojeva: izohipse, visinske točke, linije oblika, prijelomnice, granica jezera i granica Parka. Metoda je tehnički ali i znanstveno gledano kompleksnija jer zahtjeva zadavanje i određivanje niza parametara: površina piksela, margine u ćeliji (udaljenost izvan odabranog područja interpolacije vrijednosti mora biti jednaka ili veća od 0), najniže i najviše z vrijednosti unutar interpoliranog područja, odabir metode drenaže, odnosno prikaza depresija ili *sinkova*, primarnog podatka (izohipse ili visinske točke), broja iteracija (optimalno 40), faktora raščlanjenosti, diskretizacijskog faktora, vertikalne standardne pogreške i tolerancije (ovisi o primarnom ulaznom podatku). Iz slike 48 se može uočiti jasna razlika u procesu interpolacije (metoda interpolacije ANUDEM je realnija za geomorfološke analize). Razlike između metoda najviše se očituju u zaravnjenijim područjima (gdje su npr. nagibi manji od 5°) koja su površinski značajno zastupljena u Parku. Za demonstraciju je dan prikaz polja na otoku Lastovu. Nagibi manji od 2° su prikazani kao trokutaste površine (budući da su nagibi manji od 2° područja akumulacije, jasno je da ta područja ne mogu izgledati kao na slici 48). Stoga, ukoliko se na temelju modela dobivenog metodom vektorizacije izohipsi s topografskih karata analiziraju krška polja (polja u kršu), jaruge, suhe doline i sl., nije poželjno koristiti TIN interpolaciju (Slika 49). Metoda ANUDEM je izrađena za stvaranje hidrološki ispravnog i što je moguće više optimalnog digitalnog modela. Nedostatak ANUDEM-a je djelomično zaglađivanje izrazito strmih nagiba (ovu metodu nije poželjno koristiti u slučaju da se analiziraju npr. strmci).



Sl. 48. Razlike između metoda TIN i ANUDEM



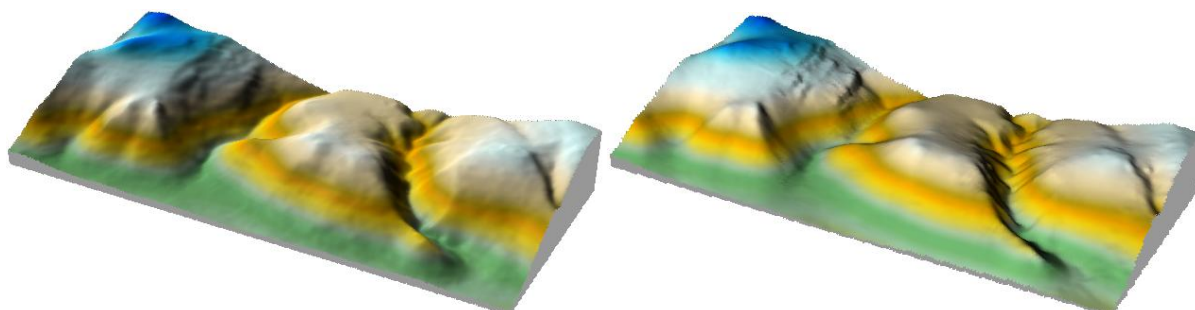
Sl. 49. Prikaz reljefa korištenjem TIN metode

5.4. Usporedba DMR-a dobivenih iz različitih skupova visinskih podataka

Da bi se okvirno⁴ utvrdile razlike između digitalnih modela reljefa izrađenih iz visinskih podataka prikupljenih aerofotogrametrijom i vektorizacijom izohipsi s HOK-a, analiziran je geomorfometrijski parametar nagib (prema geomorfološkim kategorijama) na području jaruga Mernjača i Mednjača (površina 230,33 ha). Uspoređene su metode *Topo to Raster* i obični kokriging (najbolja metoda za aerofotogrametrijski prikupljene podatke) (Slika 50). Oba modela imaju prostornu rezoluciju 5 metara (površina piksela 25 m²) zbog čega je moguća usporedba broja elemenata *grida* (piksela) i vrijednosti u istima. Najveće razlike u površinama utvrđene su za kategoriju nagiba od 12,01 do 32°, što je i logično s obzirom da je ista najzastupljenija u promatranom području. Najmanje razlike utvrđene su za kategoriju od 2,01 do 5° (Tablica 8). Generalno, i jedan i drugi model su prikladni za opće geomorfološke analize. Međutim, ukoliko se rade specifične analize npr. strmaca ili mikro denudacijskih oblika, bolje rezultate pokazuju podatci prikupljeni aerofotogrametrijom i interpolirani metodom obični kokriging. Te razlike uočljive su na trodimenzionalnim prikazima.

Tablica 8. Razlike između modela izrađenih iz različitih skupova visinskih podataka

Klase (°)	TOPO (E)	OČK – e (E)	TOPO (ha)	OČK – e (ha)	Razlika (ha)	TOPO (%)	OČK – e (%)	Razlika (%)
<2	1111	1052	2,778	2,630	-0,148	1,206	1,142	-0,064
2,01-5	5286	5301	13,215	13,253	0,037	5,737	5,754	0,016
5,01-12	18338	19358	45,845	48,395	2,550	19,904	21,011	1,107
12,01-32	64757	63115	161,893	157,788	-4,105	70,287	68,505	-1,782
>32,01	2641	3307	6,603	8,268	1,665	2,867	3,589	0,723



Sl. 50. Razlike između modela izrađenih iz različitih skupova visinskih podataka

⁴ Vidi poglavlje 3.7.

6. IZRADA DMR-A IZ PODATAKA PRIKUPLJENIH FOTOGRAMETRIJOM

Točkasti, linijski i površinski visinski podatci prikupljeni fotogrametrijskom restitucijom nalaze se u Topografskoj bazi podataka Državne geodetske uprave. Važan su dio svake nacionalne infrastrukture podataka. Pravila izrade i prikupljanja podataka uspostavljena su kroz studiju i idejni projekt Službenog topografsko-kartografskog sustava (STOKIS). Prema „Studiji o nadomještaju reprodukcijских izvornika“ i „Ažuriranje sadržaja topografskih karata“ (1995) predložena metoda za prikupljanje podataka bila je fotogrametrijska, međutim s obzirom na ograničena investiranja u zračne snimke i fotogrametrijske instrumente, koristila se i metoda vektorizacije izohipsi i visinskih točaka iz postojećih karata u mjerilu 1:5000. Visinski podatci koriste se za različite potrebe, međutim prvenstveno za izradu izohipsi na TK25 i kao osnova za rektifikaciju ortofota. Za stereoizmjeru se koriste dva tipa fotogrametrijskih uređaja: analitički instrumenti i digitalne fotogrametrijske stanice. Operateri prikupljaju podatke o vrstama objekata prema kriterijima koji su definirani CROTIS-om (Hrvatski topografsko-informacijski sustav). Instrumenti imaju točnost pozicioniranja mjerene markice ispod 5 μ m. Gustoća prikupljanja podataka ovisi o vrsti terena, nagibu i vertikalnoj raščlanjenosti. Prosječan razmak između točaka u prijelomnicama i linijama oblika iznosi oko 25 metara, a prosječan razmak u rasteru visinskih točaka je oko 90 metara. Za izradu rasterskog DMR-a korišteno je 14 slojeva (Tablica 9): nasip, usjek, uska cesta, put/staza, obalna linija, kanal, uski kanal, vode stajačice, potok, pojedinačne markantne točke, raster visinskih točaka, prijelomnica, linija oblika (DGU, 2003). Svaki sloj ima brojčane šifre i pod šifre po kojima se može razlikovati od drugih slojeva.

Izrada DMR-a iz navedenih podataka uključivala je nekoliko koraka: 1) konvertiranje podataka iz jednog formata u drugi – podatci su preko alata *Conversation Tool (To Geodatabase)*, točnije *Feature Class to Feature Class* konvertirani iz DGN formata u *Geodatabase*. Alat je preko opcije SQL omogućio pretraživanje slojeva po šiframa i pod šiframa i odabir kartografske projekcije; 2) konvertiranje linija, točnije lomnih točaka u pojedinačne točke. Npr. određena prijelomnica, bez obzira na dužinu, je imala jednu vrijednost za visinu koja se odnosila na vrijednost prve lomne točke. Međutim, ta linija je sastavljena od više lomnih točaka, gdje svaka točka ima x, y koordinatu i visinu. S obzirom da većina interpolacijskih metoda koristi točke kao ulazne podatke, bilo je potrebno izvršiti konvertiranje. Ono je napravljeno pomoću ekstenzije *ET GeoWizard*, točnije alata *Polyline M (Z) to Point*; 3) topološka korekcija podataka – brojne linije i točke nisu zadovoljavale topološka pravila.

Potrebno je naglasiti da za TIN metodu interpolacije nije potrebno vršiti konvertiranje linija u točke, jer se pomoću metode mogu prepoznati lomne točke unutar određene linije. Bitno je da se prilikom zadavanja polja visine odabere alat *Shape (Z)* jer sadrži prave vrijednosti visina dobivenih stereorestitucijom; 4) testiranje metoda interpolacije – odabrano je 17 metoda interpolacije (9 determinističkih i 8 geostatističkih); 5) odabir prostorne rezolucije, pri čemu je uspoređeno nekoliko metoda (Hengel, 2006).

Tablica 9. Slojevi korišteni u izradi rasterskog DMR-a (DGU, 2003)

Sloj	Šifra	Pod šifra	Opis
Nasip	7	4 (gornja linija) i 6 (donja linija)	Uključeni su nasipi viši od 2 metra koji imaju površine veće od 20 m ² .
Usjek	7	116 (gornja linija) i 118 (donja linija)	Uključeni usjeci viši od 2 metra
Uska cesta	22	6	Prometnica uređenog kolnika bilo koje vrste (beton, asfalt, gotovi elementi, makadam) uža od 3 metra.
Put/staza	22	4 (put), 4-2 (staza)	Prometnica neuređenog kolnika (zemlja ili dobro utabana zemljana površina) uža od 3 metra. U ovu kategoriju spadaju i pješačke staze.
Obalna linija	41	izgrađena (7) ili prirodna (1)	Obalnu liniju određuje rub korita vodotoka. U slučaju vodotoka koji nemaju uređeno korito, obalna linija je linija plavnog područja u vrijeme najvišeg vodostaja do kojeg se npr. Rijeka još ne smatra izlivenom.
Kanal	43		Umjetno izgrađeno korito vodotoka šire od 1 metra.
Uski kanal	44		Umjetno izgrađeno korito vodotoka uže od 1 metra.
Vode stajačice			To su jezera, bare rukavci, ribnjaci i lokve. Prikazuju se ako im je površina veća od 500 metara kvadratnih.
Potok	45	Vododerine (1-0), brazde (1-2), jaruge (1-4)	Prirodni vodotok uži od 3 metra. Može biti privremenog ili stalnog karaktera. Vododerine (1-0), brazde (1-2), jaruge (1-4) se smatraju vrstom potoka.
Pojedinačne markantne točke	51		najviše i najniže točke karakterističnih objekata krajobraza poput vrhova ili vrtača
Raster visinskih točaka	52		Neravnomjerno raspoređene izmjerene visinske točke koje popunjavaju površinu okruženu prijelomnicama i linijama oblika.
Prijelomnica	53		Opisuju promjene nagiba, uglavnom prekide poput grebena, usjeka, nasipa, obala, a prepoznaju se kao lom terena.
Linije oblika	54		Opisuje blage oblike terena npr. najviša linija duž grebena.

6.1. Interpolacija aerofotogrametrijski prikupljenih podataka

Interpolacija aerofotogrametrijskih visinskih podataka provedena je u dvije faze. U prvoj fazi softver je optimizirao parametre za determinističke i geostatističke metode interpolacije (Tablica 10). U drugoj fazi parametri su određivani ručno s ciljem usporedbe ručno i automatski zadanih parametara. Za statističku usporedbu metoda interpolacije korištena je metoda unakrsnog vrednovanja, metoda podijeljenih uzoraka i *jackknifing*. Deskriptivna statistika je najprije izračunata za 83657 visinskih točaka (šire područje PP Vransko jezero)⁵, od kojih se 70806 odnosi na točke prikupljene fotogrametrijskom izmjerom i stereorestitucijskom obradom i 12851 točka prikupljena batimetrijskom izmjerom.

Tablica 10. Parametri metoda interpolacije

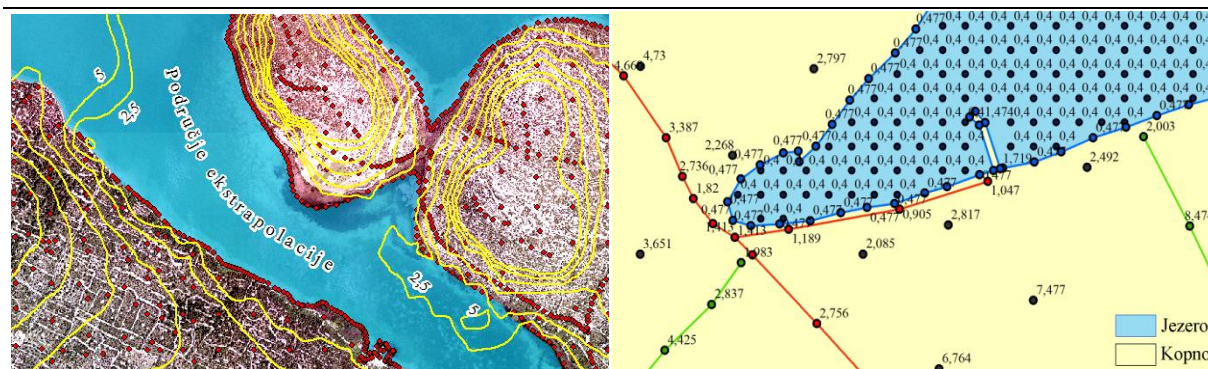
MI*	Jačina	Model	Doseg	Prag	Odstu.*	Odmak	Udaljenost	BO*	BP*
IDW	2						4912,4		1
LP	1						127,8		1
CRS	2,368						4912,4		1
SWT	0,426						4912,4		1
M	0						4912,4		1
IM	4,997						4912,4		1
TPS	1e20						4912,4		
OK		Sferni	10894,70	7925,41	611,86	1190,1	14281,2	12	4
SK		Sferni	6733,01	6763,00	0,00	1108,3	13299,6	12	4
UK		Sferni	13509,62	0,00	3,33	1190,1	14281,2	12	4
DK		Sferni	6243,53	0,89	0,10	1032,4	12388,8	12	4
OCK		Sferni	8043,85	7147,80	307,70	1190,1	14281,2	12	4
SCK		Sferni	7029,85	6483,60	0,00	1161,5	13938,0	12	4
UCK		Sferni	10895,00	0,00	3,32	1190,1	14281,2	12	4
DCK		Sferni	6242,99	0,89	0,10	1032,3	12388,8	12	4

*MI – metoda interpolacije, Odst. – odstupanje, BO – broj odnosa, BS – broj susjeda, BS – broj sektora

Batimetrijski izmjerene točke su korištene da bi se izbjegla ekstrapolacija u obalnom dijelu jezera (Slika 51). Ovaj problem (u slučaju da nije napravljen premjer jezera) se može riješiti dodavanjem pravilnog rastera točaka unutar jezera (npr. s razmakom od 10 metara) s istim vrijednostima (npr. 0,4 metra) (Slika 52). Identični problemi pojavljuju se i kod izrade digitalnog modela reljefa određenog otoka. Dakle, ukoliko se na područje mora ne

⁵ Šire područje obuhvaća 202,5 km² (30 listova), pravokutnik dimenzija 13,5 kilometara istok-zapad i 15 kilometara sjever-jug. Razlozi korištenja visinskih točaka izvan PP Vransko jezero su: ukazati na promjenjivost statističkih rezultata ovisno o broju ulaznih podataka (visinskih točaka) i izbjeći ekstrapolaciju (nepouzdanost modela) u rubnim dijelovima PP Vransko jezero.

postave točke s istim vrijednostima visina, pogreške u obalnim područjima modela bit će izrazito velike, što će utjecati na izlazne rezultate geomorfometrijskih analiza.

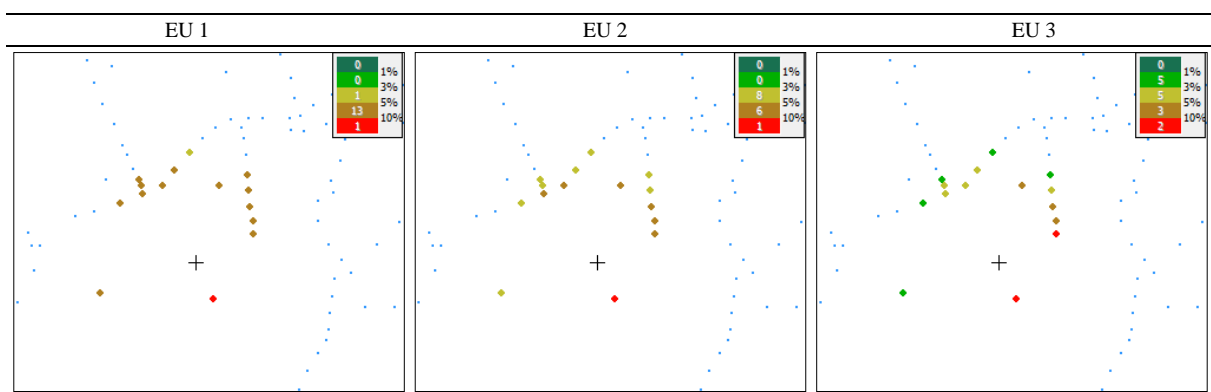


Sl. 51. Problem ekstrapolacije u obalnim područjima jezera

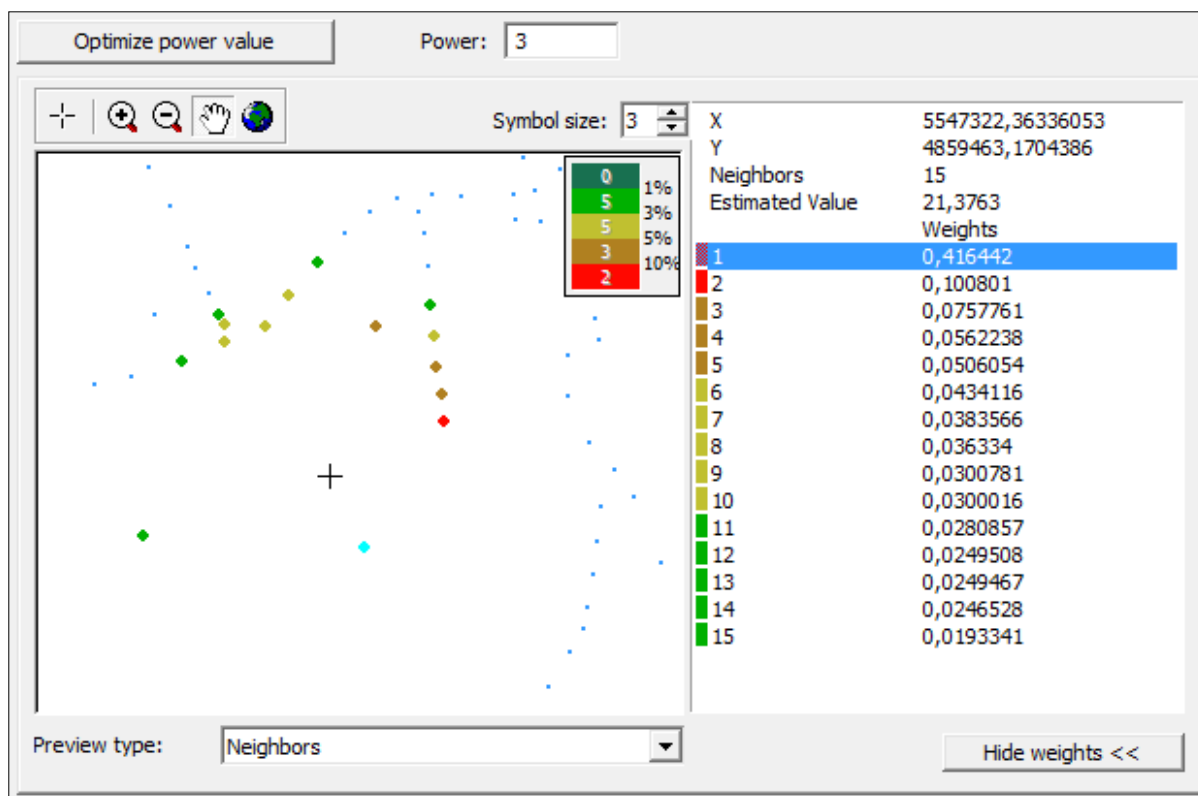
Sl. 52. Primjer mogućeg rješenja ekstrapolacije u obalnim područjima

Da bi se utvrdile značajke podataka prikupljenih aerofotogrametrijskom izmjerom i stereorestitucijskom obradom, izračunati su statistički pokazatelji za 15542 točke koje se odnose na kopneni dio unutar PP Vransko jezero.

Kod determinističkih metoda interpolacije na izlazne rezultate standardne devijacije i drugih statističkih parametara utječu eksponent udaljenosti, broj susjeda, udaljenost i tip sektora (Tablica 10). Ukoliko je kod metode inverzna udaljenost eksponent udaljenosti 0, tada svi susjedi imaju jednak težinski koeficijent za točku za koju se procijenjuje vrijednost. Povećanjem eksponenta udaljenosti, smanjuje se utjecaj (težinski koeficijent) onih točaka koje su udaljenije (Slika 53). Npr. ukoliko je eksponent udaljenosti 1, vrijednost točke za koju se procijenjuje vrijednost (križić) iznosi 17,918 m; ako je eksponent udaljenosti 2, vrijednost za istu točku se povećava za 1,582 metra (19,5); za eksponent udaljenosti 3 vrijednost iznosi 21,376 metara. Razlog je što dvije točke koje su najbliže točki za koju se procijenjuje vrijednost imaju najveći težinski koeficijent. Najbliža točka (označena) ima najveći težinski koeficijent 0,416, dok najmanji ponder iznosi 0,019 (Slika 54).



Sl. 53. Utjecaj eksponenta udaljenosti na raspored težinskih koeficijenata (IDW)

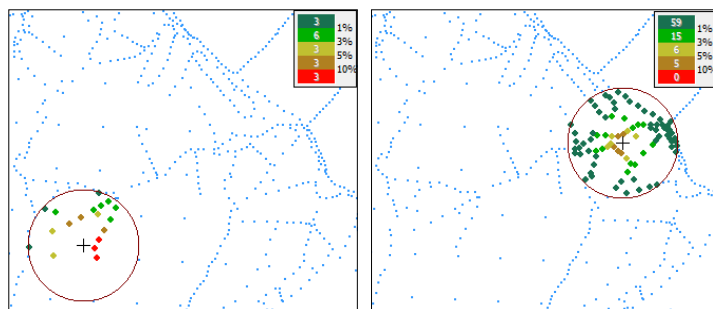


Sl. 54. Primjer dodjeljivanja težinskih koeficijenata za 15 susjednih točaka (IDW)

Kod radijalnih osnovnih funkcija svaka metoda ima različit eksponent udaljenosti, što utječe na raspored vrijednosti težinskih koeficijenata ovisno o broju susjeda. Za sve determinističke metode vrijedi pravilo da eksponent udaljenosti ovisi o broju susjeda i tipu sektora.

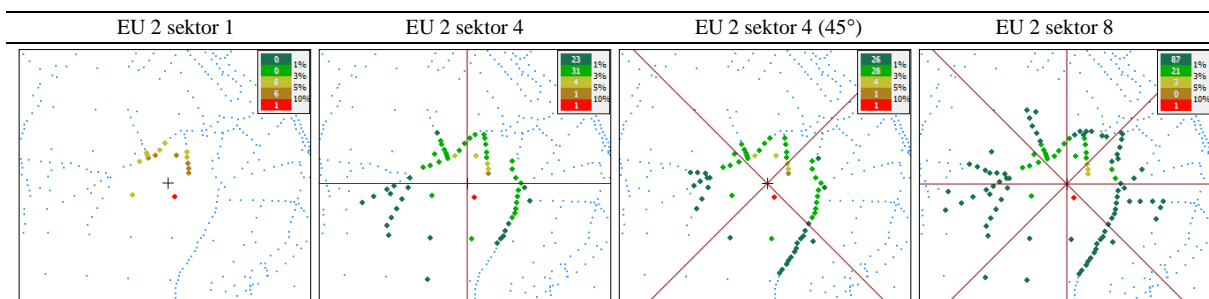
Za sve determinističke metode interpolacije udaljenost je iznosila 4912,4 metra, osim za lokalnu polinomnu (127,8 metara). Korišten je kružni izotropni model. Generalna pretpostavka je da na točku za koju se procijenjuje vrijednost, okolne izmjerene točke utječu ravnomjerno (bez definiranog smjera).

Brojem susjeda se određuje koliko će točaka utjecati na izlazni rezultat točke za koju se procijenjuje vrijednost. Broj susjeda koji su utjecali na izlazne rezultate točke za koje se procijenjuje vrijednost bio je 15 (osim za lokalnu polinomnu). Za lokalnu polinomnu metodu broj susjeda koji utječu na točku za koju se procijenjuje vrijednost neprestano se mijenja. On ovisi prvenstveno o udaljenosti i gustoći točaka oko točke za koje se procijenjuje vrijednost. Dakle, uključeno je onoliko točaka koliko se nalazi unutar definirane udaljenosti. Na slici 55 (lijevo) broj susjeda koji utječu na točku za koju se procijenjuje vrijednost iznosi 18, a na slici 55 (desno) 85.



Sl. 55. Utjecaj udaljenosti na broj susjednih točaka kod lokalne polinomne metode

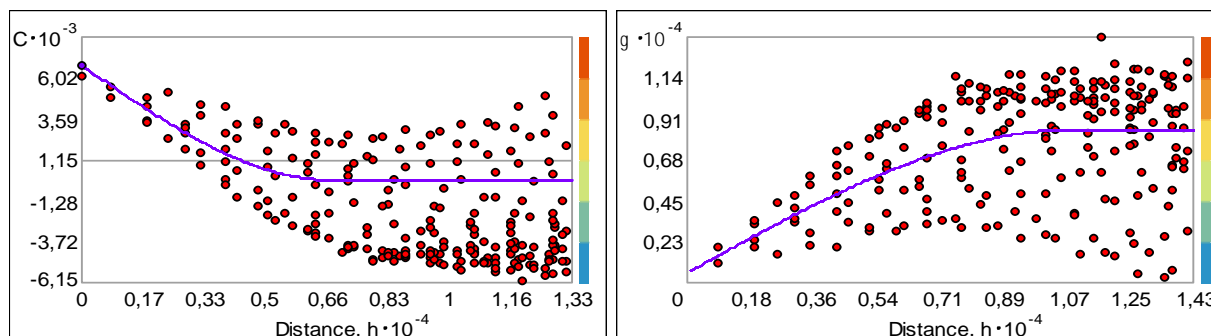
U ekstenziji *Geostatistical Analyst* postoje četiri tipa sektora: sektor bez podjele, sektor podijeljen na četiri dijela, sektor podijeljen na 4 dijela pod nagibom od 45° i sektor podijeljen na 8 dijelova. Dakle, o odabranom sektoru ovisi broj i raspored susjednih točaka (Slika 56). Promjenom tipa sektora zadani broj susjeda se umnožava s brojem podjela. Odabrani sektor značajno utječe na rezultate točke za koju se procijenjuje vrijednost. Npr. za metodu IDW, pri eksponentu udaljenosti 2 i sektoru 1 (15 susjeda), točka za koju se procijenjuje vrijednost iznosi 19,501. Za sektor 4 (60 susjeda, 15 u svakom sektoru) vrijednost je 19,847, za sektor 4 (45°) (60 susjeda) vrijednost je 20,116 i za sektor 8 (120 susjeda, 15 u svakom sektoru) vrijednost iznosi 19,628. Najmanja razlika procijenjenih vrijednosti je između sektora 1 i 8 (0,127). S obzirom da se većina interpolacija temelji na Toblerovom pravilu (1970), može se zaključiti da je nepotrebno povećavati broj susjeda koji bi trebali utjecati na izlazne rezultate točaka za koje se procijenjuje vrijednost. Kod LP metode sektori ne utječu na izlazne rezultate točaka za koje se procijenjuje vrijednost. Za ROF softver je optimizirao sektor 1 i zadao 15 susjeda koji utječu na točku za koju se procijenjuje vrijednost. Promjenom sektora 4 ili 8, broj susjeda se mijenja. Za razliku od inverzne udaljenosti, kod ROF promjenom tipa sektora npr. u sektor 8 broj susjeda nije 120 nego 64, jer se zadani broj susjeda automatski smanjuje na 8.



Sl. 56. Značenje sektora na raspored i utjecaj susjednih točaka na točku za koju se procijenjuje vrijednost

Na izlazne rezultate geostatističkih metoda utječe izrađeni semivariogram ili kovarijanca, broj susjeda i tip sektora. Za sve geostatističke metode eksperimentalni

semivariogram ili kovarijanca integrirana je u sferni model (jedan od najčešće korištenih), broj susjeda je 5 (točnije 20, zbog odabranog tipa sektora), sektor podjeljen na 4 s nagibom od 45° (Tablica 10).



Sl. 57. Kovariogram za metodu jednostavni kriging

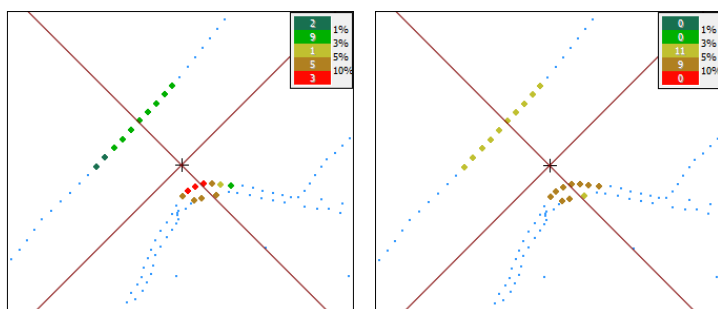
Sl. 58. Semivariogram za metodu obični kriging

Na slici 57 je prikazan kovariogram za metodu jednostavni kriging, dobivena na temelju 83657 izmjerenih točaka. Podatci su analizirani (uspoređeni) na ukupnoj udaljenosti od 13299,6 metra, točnije u 12 klasa s odmakom 1108,3 metara. Odstupanje je iznosilo 0, a doseg je presjekao prag na 6733,01 metra. Krivulja sfernog modela prestaje rasti i dolazi do zaravnavanja, nakon čega ne postoji prostorna ovisnost podataka.

Na drugoj slici (58) je prikaz semivariograma za metodu obični kriging. Eksperimentalni semivariogram je integriran u sferni model. Odstupanje je 611,86 m, a doseg je presjekao prag (7925,4) na 10894,7 metara.

Kod kreiranja semivariograma najvažniji parametri su teorijski model i udaljenost na kojoj se podatci uspoređuju. Oni utječu na doseg, prag i odstupanje, a time i na izlazne statističke pokazatelje. Za razliku od determinističkih metoda interpolacije, udaljenost je kod geostatističkih metoda podjeljena na odmake i broj odmake. Za sve metode broj odmake (klasa) bio je 12 (optimalan broj u korištenom softveru). Npr. za metodu obični kriging broj točaka iznosi 83657, eksperimentalni variogram integriran je u sferni model, udaljenost na kojoj se uspoređuju podatci je 14281,2 metara, broj sektora 4, broj susjeda 5, standardna devijacija iznosi 2,484. Ukoliko se podatci uspoređuju na udaljenosti 1200 metara, a ostali parametri su identični, odstupanje je 0, a standardna devijacija je manja za 1,588 (0,896). Na izlazne rezultate statističkih pokazatelja znatno utječe i odstupanje. Npr. ako se odstupanje ne uzima u obzir prilikom kreiranja semivariograma, standardna devijacija za metodu obični kriging iznosi 0,897. U tom slučaju točke za koje se procijenjuje vrijednost znatno premašuju vrijednosti susjeda (okolnih točaka) koji utječu na procjenu. Na slici 59 točka za koju se procijenjuje vrijednost (križić) iznosi -4,081. Na nju utječe 20 susjeda, raspoređenih u sektoru

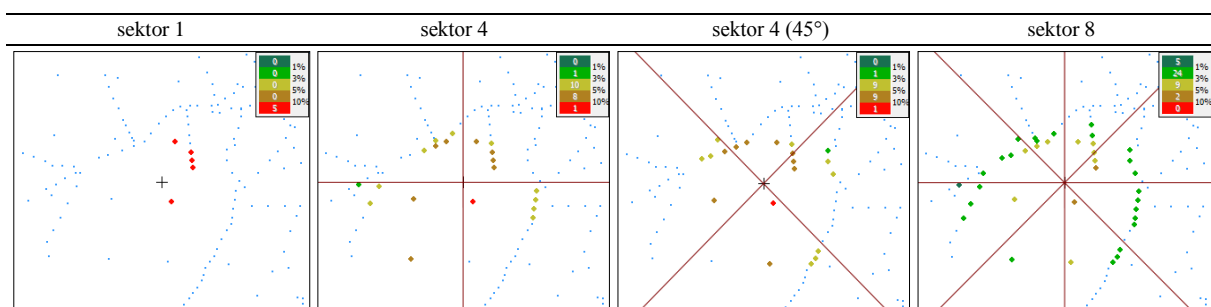
4 pod nagibom od 45° . Ukoliko se koristi parametar odstupanja (611,86) prilikom kreiranja semivariograma, za istu točku procijenjena vrijednost iznosi -2,281, dakle za 1,8 metar manje. Od prikazanih 20 točaka niti jedna točka nema izmjerenu vrijednost veću od -3 metra. S obzirom da se reljef pojezerja blago uzdiže prema kopnenom dijelu (što je provjereno i na terenu), nije moguće da procijenjena vrijednost bude preko -4 metra.



Sl. 59. Primjer rasporeda i utjecaja susjednih točaka prilikom a) nekorištenja i b) korištenja odstupanja (*nugget effect*)

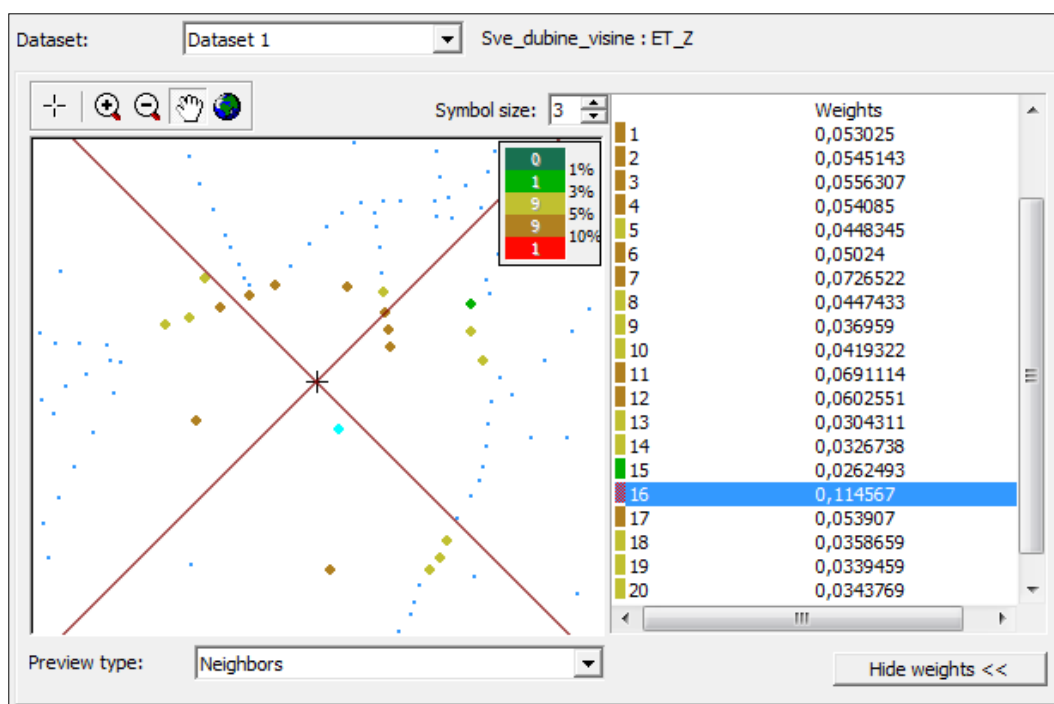
Kod geostatističkih metoda optimiziran broj susjeda je 5, međutim s obzirom na sektor (4 pod nagibom od 45°) broj susjeda koji utječe na točku za koju se procijenjuje vrijednost je 20.

Promjenom tipa sektora zadani broj susjeda se, kao kod determinističkih metoda, umnožava s brojem podjela. Odabrani sektor značajno utječe na rezultate točke za koju se procijenjuje vrijednost. Npr. za metodu OK pri 5 zadanih susjeda u sektoru 1, točka za koju se procijenjuje vrijednost iznosi 22,626 (Slika 60). Za sektor 4 (20 susjeda, 5 u svakom sektoru) vrijednost je 20,27, za sektor 4 (45°) (20 susjeda) vrijednost je 20,659 i za sektor 8 (40 susjeda, 5 u svakom sektoru) vrijednost iznosi 20,76. Razlika je značajnija između sektora 1 i ostala 3. Na slici 60 se može vidjeti raspored težinskih koeficijenata za susjedne točke, ovisno o sektoru.



Sl. 60. Značenje sektora na raspored i utjecaj susjednih točaka na točku za koju se procijenjuje vrijednost

Iz slike 61 je vidljivo da se raspored i udio težinskih koeficijenata kod geostatističkih metoda značajno razlikuje od determinističkih. Kod metode obični kriging, najveći utjecaj na točku za koju se procijenjuje vrijednost ima označena točka s težinskim koeficijentom od 0,114



Sl. 61. Primjer dodjeljivanja težinskih koeficijenata za 20 susjednih točaka (OK)

(11,4%). Raspon vrijednosti drugih 19 težinskih koeficijenata kreće se od 0,072 (druga najveća vrijednost) do 0,026 (najmanja vrijednost). Označena točka kod determinističkih metoda ima težinski koeficijent 0,416 (41,6%), dok je raspon drugih 14 točaka od 0,1 (druga najveća vrijednost) do 0,019 (najmanja vrijednost) (Slika 61). Iz primjera se može zaključiti kako su težinski koeficijenti kod geostatističkih metoda ravnomjernije raspoređeni na susjedne točke koje utječu na točku za koju se procjenjuje vrijednost.

Tablica 11. Parametri metoda interpolacije

MI*	Trend	Model	Doseg	Prag	Odstu.*	Odmak	Udaljenost	BO*	BP*
OK	1	Sferni	13509,6	0	2,127	1190,1	14281,2	12	4
OK	2	Sferni	13509,6	0	1,704	1190,1	14281,2	12	4
UK	1	Sferni	192,679	2,221	0	32,841	394,092	12	4
UK	2	Sferni	60,519	1,874	0	9,937	119,244	12	4

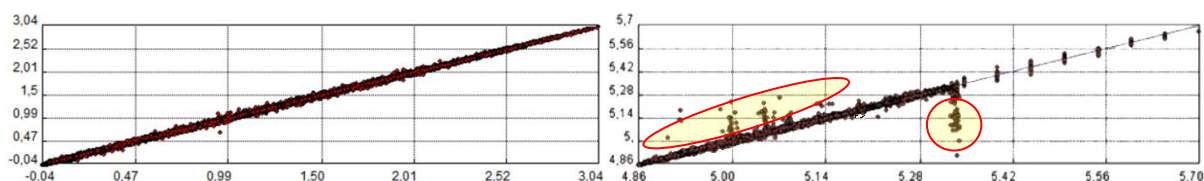
*MI – metoda interpolacije, Odst. – odstupanje, BO – broj odmaka, BS – broj susjeda, BP – broj podjela

Tablica 12. Rezultati za metodu unakrsnog vrednovanja

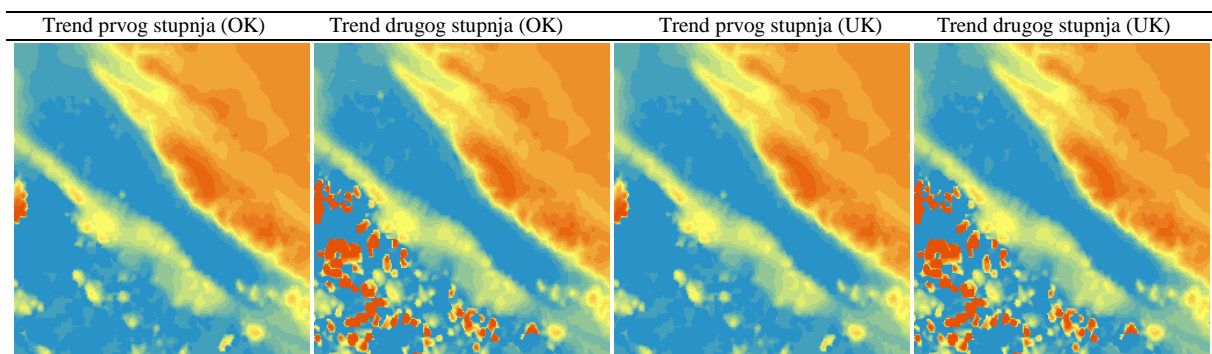
MI	Broj izmjerenih točaka	Trend	Minimalna vrijednost (m)	Maksimalna vrijednost (m)	Zbroj vrijednosti (m)	Srednja vrijednost (m)	Varijanca (m ²)	Standardna devijacija (m)
OK	83657	1	-24,685	21,044	-1507,337	-0,018	1,885	1,373
OK	83657	2	-28,003	20,409	-74,238	-0,001	1,963	1,401
UK	83657	1	-25,179	16,784	784,083	0,009	0,769	0,877
UK	83657	2	-2464,2	206,220	-11587,330	-0,530	88,548	9,410

*MI – metoda interpolacije, Odst. – odstupanje, BO – broj odmaka, BS – broj susjeda, BS – broj sektora

Kod geostatističkih metoda postoji mogućnost transformacije podataka (softver za testirane geostatističke metode nudi opciju bez transformacije ili normalan rezultat – distribucija (*normal score*)) i odabir trendova: bez trenda, konstantni i linearni (prvog, drugog i trećeg stupnja). Za metode obični i jednostavni kriging i kokriging softver nije zadao transformaciju i odabrao je opciju bez trenda. Odabrani trend i transformacija može utjecati i pozitivno i negativno na rezultate statističkih pokazatelja dobivenih metodom unakrsnog vrednovanja (Medak i dr., 2008; Kambre i Aggrawal, 2011). Medak i dr. (2008) su za izradu modela jezera Kozjak odabrali metodu univerzalni kriging. Za visinske podatke su koristili trend prvog stupnja. Iz predikcijskog grafa (Slika 63) mogu se uočiti značajne razlike između procijenjenih i izmjerenih vrijednosti (pojedine iznose i preko 40 metara) s obzirom na vertikalnu raščlanjenost (razlika između najniže i najviše visine iznosi oko 84 metra). Iz slike 63 se vidi da je velik udio crvenih točkica koje su udaljenije od linije najboljeg rješenja (označena područja). Razlog su najvjerojatnije veće pogreške prilikom batimetrijske izmjere.⁶ Za visinske podatke šireg područja PP Vransko jezero testirana je ista metoda s trendom prvog stupnja (Tablica 11 i 12). Vertikalna raščlanjenost reljefa je veća od ranije spomenutog područja (razlika između najniže i najviše visine iznosi 307,7 metra). Najveća predikcijska pogreška iznosi 25,179 metara. Vidljivo je da se crvene točke nalaze uz liniju najboljeg rješenja, te da nema većih odstupanja (Slika 62).



Sl. 62. Pravci regresije mjernih i predikcijskih vrijednosti za šire područje PP Vransko jezero
Sl. 63. Pravci regresije mjernih i predikcijskih vrijednosti za sjeverno područje jezera Kozjak



Sl. 64. Trendovi za visinske podatke šireg područja PP Vransko jezero

⁶ Batimetrijska mjerenja su opterećena slučajnim pogreškama instrumentarija i drugih vanjskih utjecaja, ali i sustavnom pogreškom nagnutosti dna (Pribičević, 2005).

U softveru su zadani linearni trendovi (prvi i drugi) za metode obični i univerzalni kriging, kako bi se utvrdila razlika standardne devijacije između trendova koji su optimizirani softverom (Slika 64). Metoda obični kriging pri linearnom trendu prvog stupnja ima standardnu devijaciju 1,374, a za trend drugog stupnja standardna devijacija iznosi 1,401. Za trend prvog stupnja, metoda univerzalni kriging ima standardnu devijaciju 0,877, dok kod trenda drugog stupnja standardna devijacija iznosi 9,41. Prilikom eksportiranja karte u raster, minimalna vrijednost koja se javlja u modelu (trend prvog stupnja) iznosi -6,52 (najniža izmjerena -3,7). Isto vrijedi i za metodu obični kriging u kojoj najniža vrijednost u rasterskom modelu iznosi čak -35,34 metra. Dakle, ponovno se javlja problem aproksimacije u područjima u kojima nisu vršena mjerenja. Metodama univerzalni kriging i kokriging nije zadana transformacija, a odabran je konstantni trend. Za metodu rastavni kriging i kokriging softver je optimizirao transformaciju kao normalni rezultat (distribucija) bez trenda.

Tablica 13. Rezultati za metodu unakrsnog vrednovanja

MI	Broj izmjerenih točaka	Minimalna vrijednost (m)	Maksimalna vrijednost (m)	Doseg (m)	Zbroj vrijednosti (m)	Srednja vrijednost (m)	Varijanca (m ²)	Standardna devijacija (m)
IDW	83657	-24,68	35,80	60,48	-2419,16	-0,028	3,842	1,960
LP	83657	-23,97	20,70	44,68	-1306,87	-0,015	3,287	1,813
CRS	83657	-67,28	29,66	96,95	-2024,93	-0,024	2,782	1,668
SWT	83657	-112,41	43,28	155,69	-1622,81	-0,019	2,217	1,489
MQ	83657	-25,02	26,50	51,52	-306,38	-0,003	1,020	1,010
IMQ	83657	-248,47	75,47	323,95	-2613,79	-0,031	4,796	2,190
TPS	83657	-10888,37	11071,25	21959,62	4516,15	0,053	3294,530	57,398
OK	83657	-25,65	27,44	53,10	2456,60	0,029	6,165	2,483
SK	83657	-25,12	16,82	41,94	326,96	0,003	0,806	0,898
UK	83657	-34,76	38,90	73,67	4539,11	0,054	12,327	3,511
DK	83657	-30,53	28,67	59,21	1973,42	0,023	40,922	6,397
OKK	83657	-22,43	17,49	39,93	494,75	0,005	2,289	1,513
SKK	83657	-24,75	12,52	37,27	-65313,82	-0,780	1,593	1,262
UKK	83657	-34,76	38,90	73,66	4539,01	0,054	12,320	3,510
DKK	83657	-27,54	24,12	51,66	-1824,74	-0,021	34,610	5,883

Usporedbom 7 determinističkih i 8 geostaističkih metoda interpolacije mogu se uočiti značajne razlike u izlaznim vrijednostima za pojedini statistički parametar. Iz tablica 13 i 14 je vidljivo koliko ulazni podatci, točnije broj visinskih točaka i raščlanjenost reljefa utječu na izlazne rezultate pojedine metode interpolacije. Da bi se dokazao utjecaj broja točaka, vertikalne raščlanjenosti, ali i izbjegla ekstrapolacija, statistički pokazatelji su izračunati za 83657 i 15542 visinske točke. Raspon minimalnih vrijednosti (u metrima) za 83657 točaka

kreće se od -10888,37 (TPS) do -22,43 (OKK), a maksimalnih vrijednosti (u m) od 12,52 (SKK) do 11071,25 (TPS). Greške u metodi TPS su povezane s metodom prikupljanja batimetrijskih podataka (veći razmak između profila (200 metara)), velika gustoća uzorkovanja u profilu). Iz tog razloga metoda je testirana samo na visinskim podacima koji su prikupljeni fotogrametrijom. Međutim, metoda je ponovno pokazala nedostatke u sjeveroistočnom djelu parka. Uočeno je da metoda loše interpolira površine na područjima gdje je varijabilnost vrijednosti visinskih podataka veća na manjim udaljenostima, ali i kad je udaljenost između točaka izraženija. Metoda tankoslojni splajn je često korištena metoda za izradu DMR-a (Gousie i Frenklin, 2003; Aguilar i dr., 2005; Erdogan, 2009). Rezultati korištenja navedene metode su često neizvjesni (Mitas i Matosova, 1999) (identičan problem „šiljaka“ javio se u radu Aguilar i dr. (2005)). Rezultati metode najviše ovise o metodi prikupljanja podataka, gustoći i vertikalnoj raščlanjenosti područja za koje se izrađuje model.

Tablica 14. Rezultati za metodu unakrsnog vrednovanja

MI	Broj izmjerenih točaka	Minimalna vrijednost (m)	Maksimalna vrijednost (m)	Doseg (m)	Zbroj vrijednosti (m)	Srednja vrijednost (m)	Varijanca (m ²)	Standardna devijacija (m)
IDW	15542	-22,71	35,80	58,51	-3123,48	-0,200	6,980	2,642
LP	15542	-18,49	20,57	39,07	1820,97	0,117	7,258	2,694
CRS	15542	-67,28	26,10	93,38	-2449,13	-0,157	5,171	2,274
SWT	15542	-112,41	43,28	155,69	-1813,76	-0,116	4,653	2,157
MQ	15542	-16,61	17,83	34,44	-476,41	-0,030	1,850	1,360
IMQ	15542	-248,47	75,47	323,95	-3090,12	-0,198	11,635	3,411
TPS	15542	-10888,37	11071,25	21959,62	6774,27	0,435	17450,146	132,099
OK	15542	-24,94	26,72	51,66	-179,37	-0,011	10,414	3,227
SK	15542	-13,61	14,86	28,47	-408,22	-0,026	1,474	1,214
UK	15542	-32,67	38,90	71,57	1204,34	0,077	20,621	4,541
DK	15542	-30,53	28,67	59,21	15766,77	1,014	51,667	7,188
OKK	15542	-16,43	16,63	33,06	-356,32	-0,022	4,109	2,027
SKK	15542	-14,90	11,63	26,54	-18530,21	-1,192	2,462	1,569
UKK	15542	-32,67	38,90	71,57	1204,28	0,077	20,612	4,540
DKK	15542	-27,54	24,12	51,66	6140,23	0,395	43,824	6,620

Na temelju minimalne i maksimalne vrijednosti izračunava se doseg (u m) (raspon između maksimalne i minimalne vrijednosti). Zbroj vrijednosti je pokazatelj ravnomjernosti između pozitivnih i negativnih vrijednosti. Ukoliko je zbroj vrijednosti pozitivan, veći je udio pozitivnih vrijednosti i obrnuto. Srednja vrijednost je bitna jer ukazuje na karakterizaciju distribucije frekvencija. Najbolja metoda po svim pokazateljima za 15542 točke (aerofotogrametrijski prikupljeni podatci unutar parka) je jednostavni kriging. Standardna

devijacija za metodu iznosi 1,214. Uz navedenu metodu treba izdvojiti i metode jednostavni kokriging i multikvadratnu ROF-u. Pri 15542 točke za metodu interpolacije jednostavni kriging doseg je manji za 13,47, međutim paralelno je standardna devijacija veća za 0,316 u usporedbi s 83867 točaka. Ovo zapravo dokazuje koliko je parametar standardne devijacije bitan. Međutim, s druge strane jasno je da i najbolje metode interpolacije imaju značajne pogreške koje se kroz ovaj parametar generaliziraju (sintetiziraju), jer standardna devijacija ukazuje na odstupanje minimalnih i maksimalnih vrijednosti od srednje vrijednosti. Npr. za metodu splajn s tenzijom standardna devijacija iznosi 2,157, što može biti dobar statistički pokazatelj. Međutim, istodobno je najveća greška u modelu -112,41 metara.

6.2. Metoda podijeljenih uzoraka i *jackknifing*

Da bi se dokazala mjera dosljednosti (stabilnosti i točnosti) korištenih interpolacijskih algoritama korištene su još dvije metode usporedbe metoda interpolacije: 1) metoda podijeljenih uzoraka i 2) metoda *jackknifing*. Za metodu podijeljenih uzoraka testne točke uzorkovane su pomoću ekstenzije *Geostatistical Analyst*, točnije alata *Create subsets*. Kod metode *jackknifing* uzorkovanje testnih točaka obavljeno je pomoću ekstenzije *Hawths Tool*, točnije *Sampling tool (create random selection)*. Proces razdvajanja radnih i testnih točaka u drugoj metodi je zahtjevniji i odvija se poluautomatski. Metode su razlikuju po metodama uzorkovanja testnih točaka (Slika 65). Treba naglasiti da izlazni rezultati statističkih parametara u obje metode nikad nisu isti, ali su slični. Npr., ukoliko 5 puta izdvajamo npr. 25% testnih uzoraka, alati će uvijek uzorkovati 25% različitih točaka. Za obje metode korišteno je 5, 25 i 50 % testnih uzoraka od ukupnog broja izmjerenih točaka (Tablice 15 i 16). Dakle, 83657 točaka podijeljeno je na radne i testne. Iz radnih su izrađeni modeli, a testne su poslužile za ocjenu stabilnosti i točnosti interpolacijskog algoritma. S 5% manje točaka (4182) dva najprikladnija interpolacijska algoritma (jednostavni kriging i multikvadratna metoda) pokazala su odlične rezultate. Vrijednost standardne devijacije za multikvadratnu metodu iznosi 0,993 (smanjila se za 0,017 u odnosu na metodu unakrsnog vrednovanja (Tablica 13)), a za metodu jednostavni kriging iznosi 0,868 (0,030 manje od metode unakrsnog vrednovanja). Vrijednost standardne devijacije s 25% (20914) manje točaka za multikvadratnu metodu se povećava samo za 0,099 (iznosi 1,109), za metodu jednostavni kriging 0,115 (iznosi 1,013). Koliko su interpolacijski algoritmi točni, potvrđuje podatak da se s 41828 (50%) točaka manje, standardna devijacija za metodu MQ povećala samo za 0,365, a za SK 0,412 u odnosu na metodu unakrsnog vrednovanja. Iz metode

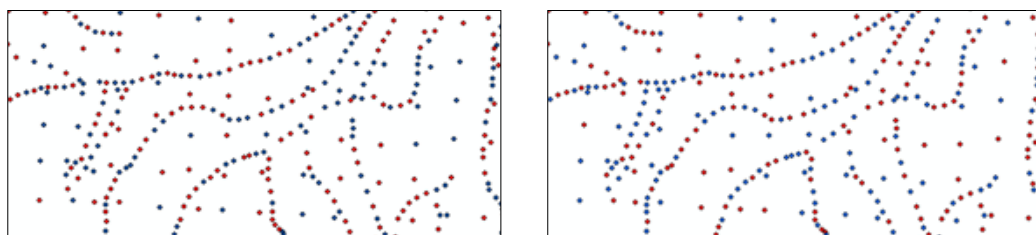
podijeljenih uzoraka može se zaključiti da je interpolacijski algoritam multikvadratne metode dosljedniji od algoritma metode jednostavni kriging kad se uspoređuju razlike vrijednosti standardne devijacije između metode podijeljenih uzoraka i metode unakrsnog vrednovanja (razlike su manje u odnosu na jednostavni kriging). Međutim, metoda jednostavni kriging za sva tri skupa testnih uzoraka ima manju standardnu devijaciju i manje minimalne i maksimalne predikcijske pogreške u odnosu na multikvadratnu metodu. To se posebno očituje kada je broj testnih točaka 50%, jer minimalna vrijednost predikcijske pogreške iznosi -32,49. Kod metode *jackknifing*, vrijednosti standardne devijacije za skupove testnih točaka slične su vrijednostima metode podijeljenih uzoraka, međutim postoje i neke razlike. Metoda jednostavni kriging je dosljednija (kad se uspoređuju razlike standardnih devijacija između *jackknifinga* i metode unakrsnog vrednovanja) i za sva tri skupa uzoraka točaka ima manju standardnu devijaciju te minimalne i maksimalne predikcijske pogreške.

Tablica 15. Rezultati za metodu podijeljenih uzoraka

MI	Posto. testnih točaka	Broj izmjerenih točaka	Minimalna vrijednost (m)	Maksimalna vrijednost (m)	Zbroj vrijednosti (m)	Srednja vrijednost (m)	Varijanca (m ²)	Standardna devijacija (m)
MQ	5	83657	-11,984	12,600	-6,164	-0,001	0,996	0,993
SK	5	83657	-7,144	11,250	-15,079	-0,004	0,932	0,868
MQ	25	83657	-16,818	16,914	-60,410	-0,003	1,053	1,109
SK	25	83657	-9,393	14,885	63,550	0,003	1,006	1,013
MQ	50	83657	-32,494	24,794	638,226	0,015	1,173	1,375
SK	50	83657	-16,804	19,870	782,045	0,019	1,145	1,310

Tablica 16. Rezultati za metodu *jackknifing*

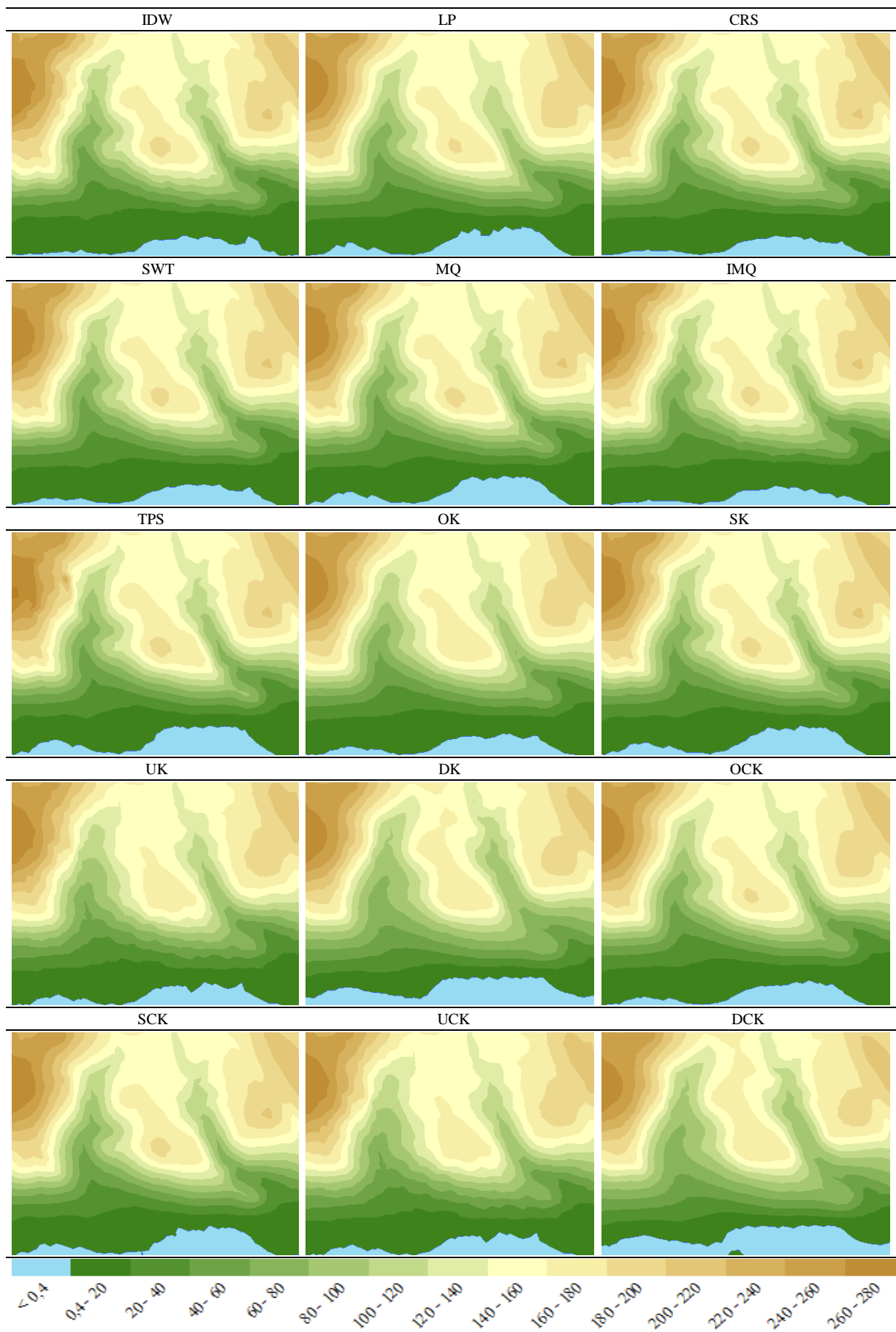
MI	Posto. testnih točaka	Broj izmjerenih točaka	Minimalna vrijednost (m)	Maksimalna vrijednost (m)	Zbroj vrijednosti (m)	Srednja vrijednost (m)	Varijanca (m ²)	Standardna devijacija (m)
MQ	5	83657	-11,422	15,085	82,746	0,019	1,098	1,048
SK	5	83657	-8,507	13,827	120,296	0,028	0,869	0,932
MQ	25	83657	-25,114	19,138	106,562	0,005	1,208	1,099
SK	25	83657	-25,118	16,877	114,398	0,005	1,038	1,019
MQ	50	83657	-26,846	24,766	62,293	0,001	1,216	1,478
SK	50	83657	-25,749	21,761	-267,523	-0,006	1,157	1,338

Sl. 65. Razlike u uzorkovanju testnih točaka (crvene) između a) metode podijeljenih uzoraka (lijevo) i b) metode *jackknifing* (desno)

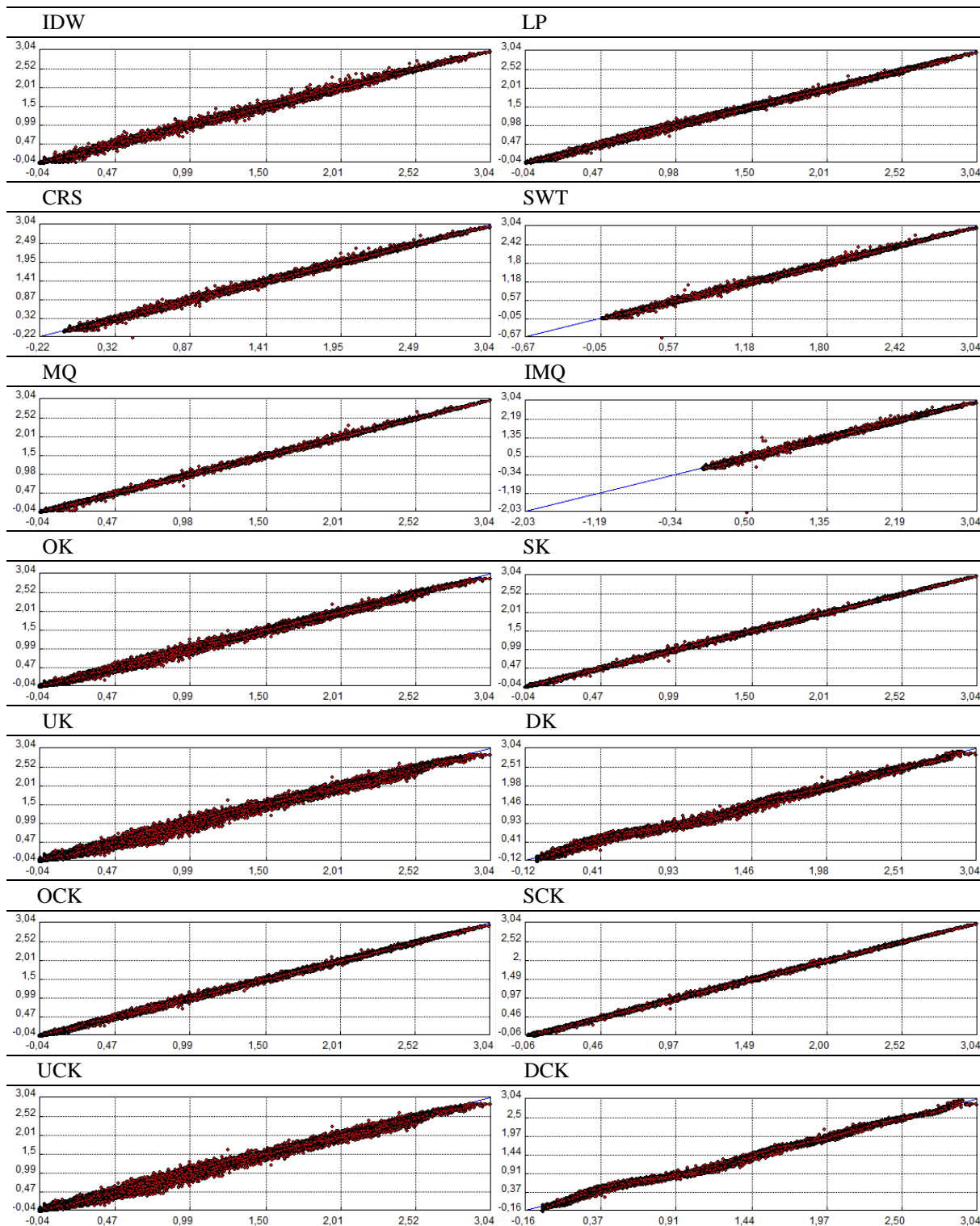
6.3. Usporedba metoda interpolacije kroz prostorne prikaze

Za vizualno utvrđivanje razlika između determinističkih i geostatističkih metoda interpolacije izrađeni su dvodimenzionalni i trodimenzionalni grafički prikazi koji prikazuju vertikalno najrašćlanjenije područje PP Vransko jezero. Ovo područje odabrano je iz razloga što je vertikalna raščlanjenost jedan od najvažnijih pokazatelja kvalitete interpolacijskih algoritama. Vizualna komponenta ima odlučujuću ulogu kod odabira metode interpolacije jer omogućuje da se izrađeni model uspoređi sa stvarnim reljefnim oblicima. Vizualna metoda često je zanemarena u znanstvenim radovima, a na njenu važnost ukazuju Mitas i Mitasova (1999; 2007). Dvodimenzionalni i trodimenzionalni grafički prikazi, za razliku od statističkih pokazatelja, jasno prikazuju nedostatke pojedinih metoda interpolacije u prikazu kontinuiranih površina jer se mogu uočiti nelogičnosti u modelu koje nastaju kao produkt interpolacijske funkcije između izmjerenih točaka. Kod dvodimenzionalnih prikaza područje je podjeljeno u 12 klasa s ekvidistancom od 20 metara (iznimke su prva i druga klasa). Prikazan je i manji segment jezera da bi se mogle uočiti razlike u generiranju promjene površine jezera ovisno o metodi interpolacije. Vizualno, metode se razlikuju po uglačanosti izohipsi i prikazu područja unutar zadanog hipsometrijskog razreda (Slika 66).

Na slici 67 je prikazano 14 grafova dobivenih korištenjem metode unakrsnog vrednovanja, koji prikazuju odnos između izmjerenih (os x) i predikcijskih (os y) vrijednosti izraženih u metrima². Grafovi su izrađeni na temelju 83675 visinskih točaka. Razlika između predikcijske i izmjerene vrijednosti naziva se greška. Plava linija se odnosi na tzv. liniju najboljeg rješenja, a isprekidana siva prikazuje odnos 1:1 između izmjerenih i predikcijskih vrijednosti. Dakle, što su crvene točkice udaljenije od plave i sive linije to je veća predikcijska pogreška i obrnuto. Raspored pogrešaka je, generalno gledajući, različit za sve metode interpolacije. Najmanje odstupanje od linije optimalnog rješenja ima geostatistička metoda jednostavni kriging. Apsolutno najveća predikcijska pogreška za optimalnu metodu interpolacije (jednostavni kriging) iznosi 25,12 metara. Najveće odstupanje od linije optimalnog rješenja ima deterministička metoda tankoslojni splajn, u kojem apsolutna pogreška iznosi čak 11071,25 metara. Metode CRS i IMQ imaju relativno pravilan raspored točaka u odnosu na liniju optimalnog rješenja. Iznimke se javljaju unutar raspona visina od 50 do 75 metara, gdje se javljaju pogreške do -248,47 za IMQ i 112,41 za SWT. Značajnije razlike između izmjerenih i predikcijskih vrijednosti vidljive su i kod metoda inverzna udaljenost, univerzalni kriging i kokriging (posebice kod visina od 50 do 120 metara). Za navedene metode maksimalna greška nije veća od 39 metara.



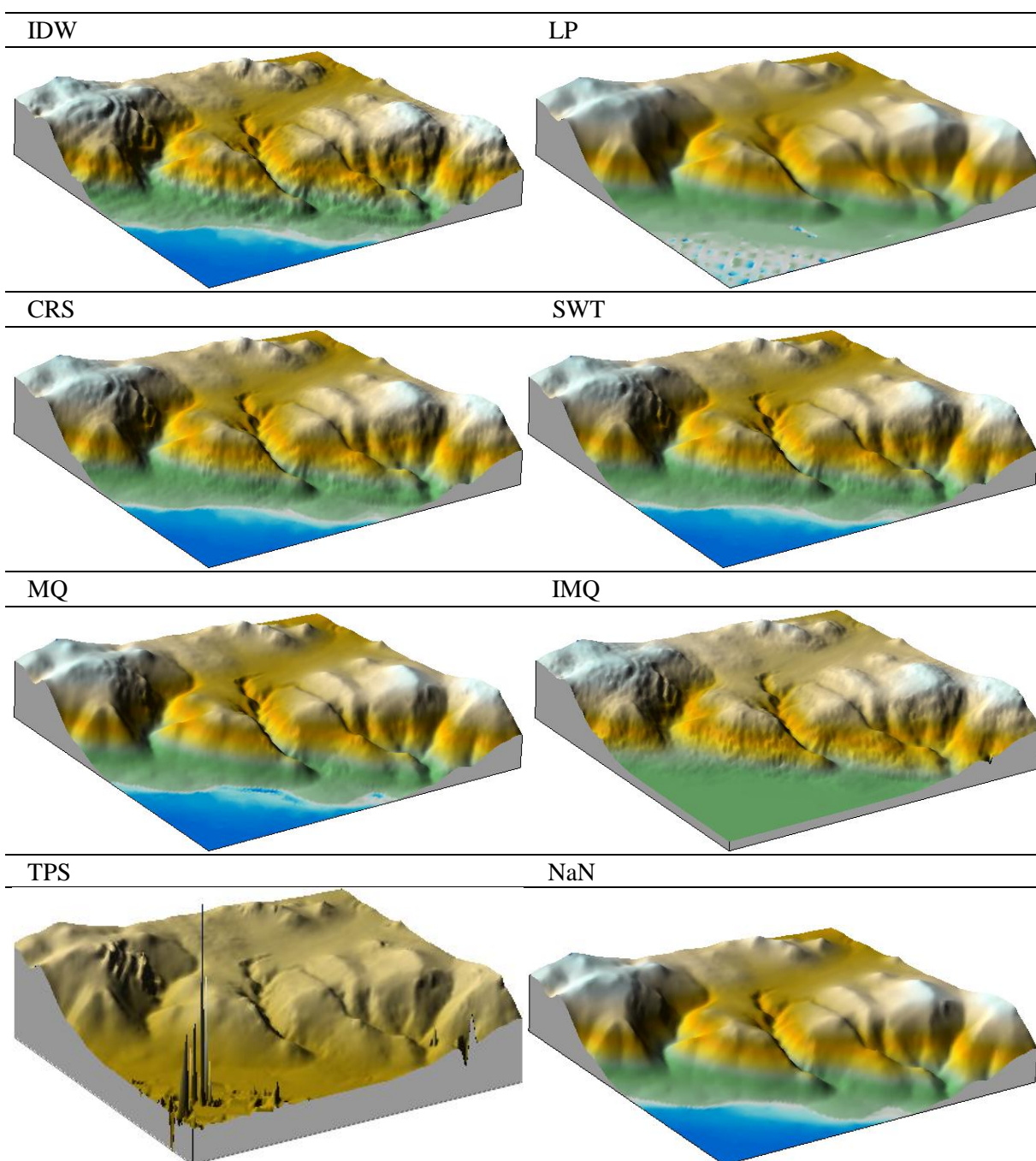
Sl. 66. Prikaz visinskih razreda vertikalno raščlanjenijeg dijela PP Vransko jezero



Sl. 67. Pravci regresije mjernih i predikcijskih vrijednosti za šire područje PP Vransko jezero

Iz trodimenzionalnih grafičkih prikaza jasno se mogu uočiti principi rada interpolacijskih funkcija s obzirom na ulazne visinske podatke i zadane parametre determinističkih (eksponent udaljenosti, udaljenost, broj susjeda, tip sektora) i geostatističkih (teorijski model, udaljenost, broj susjeda, tip sektora) metoda interpolacije. Iz slike 68 su

vidljivi nedostaci (udubljenja) metode inverzna udaljenost pri eksponentu udaljenosti 2. Pri većem eksponentu, udubljenja su još izraženija. Primjer dokazuje da metoda IDW ima ograničenu primjenu u geomorfometrijskim analizama, posebice kod analize zakrivljenosti padina. Metoda lokalna polinomna, za razliku od inverzne udaljenosti, značajno zaglađuje površine i pokazuje nedostatke na području jezera zbog velike gustoće prikupljenih točaka unutar profila i razlika u visinama. Radijalne osnovne funkcije ukazuju na razlike između kernelovih funkcija, te ističu ulogu eksponenta udaljenosti na izlazne rezultate (Tablica 10).



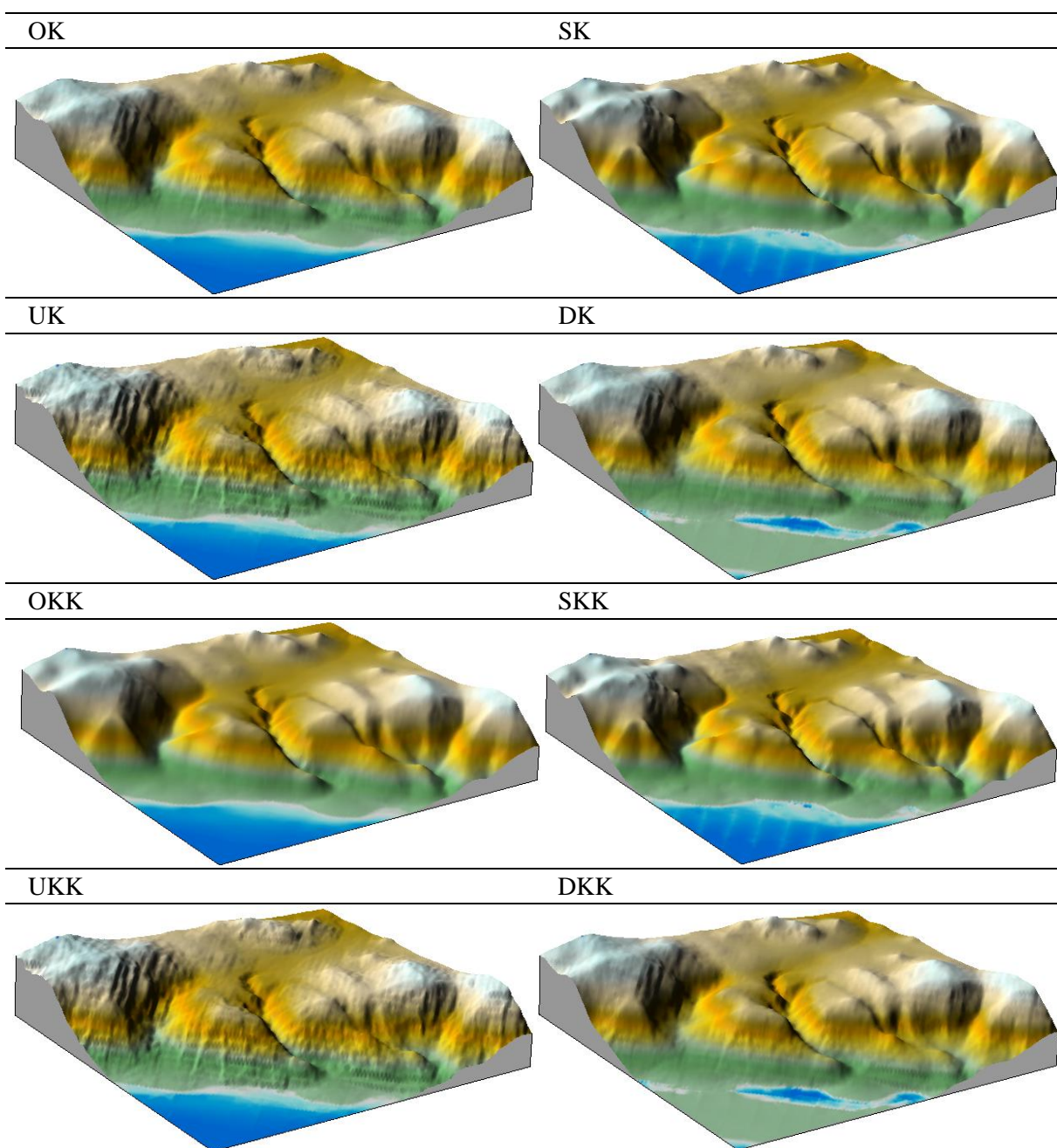
Sl. 68. Trodimenzionalni prikaz vertikalno raščlanjenijeg dijela PP Vransko jezero

Najbolje rezultate postiže multikvadratna metoda, a zadovoljavajuće metode splajn s tenzijom i potpuno regularni splajn. Najveće nedostatke ima metoda tankoslojni splajn. Za metodu je karakteristično da je reljef u pojedinim dijelovima parka realno prikazan, dok se u drugim dijelovima javljaju ekstremne greške. Greške su povezane s metodom prikupljanja batimetrijskih podataka (veći razmak između profila, velika gustoća uzorkovanja u profilu). Iz tog razloga metoda je testirana samo na visinskim podacima koji su prikupljeni fotogrametrijom. Međutim, metoda je ponovno pokazala nedostatke u sjeveroistočnom dijelu Parka. Uočena je loša interpolacija površine na područjima gdje je varijabilnost visinskih vrijednosti veća. Druga metoda koja nije pokazala dobre rezultate je inverzna multikvadratna metoda. Model izgledom podsjeća na metodu inverzna udaljenost, bez obzira što se radi o konceptualno drugačijoj metodi. Razlog je eksponent udaljenosti koji iznosi 5.

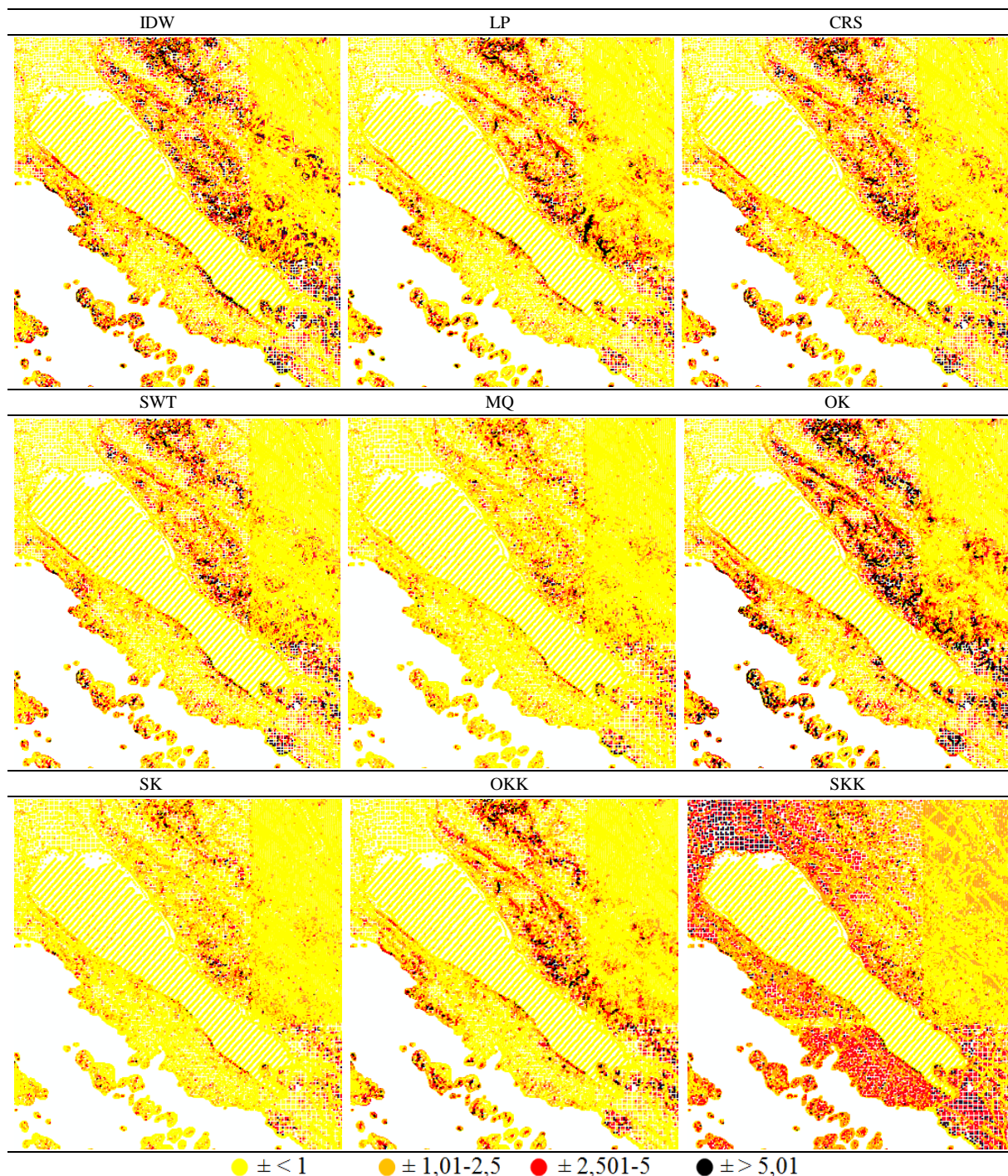
Od determinističkih metoda posebno treba istaknuti metodu prirodnog susjeda. Od svih analiziranih metoda tehnički je najmanje zahtjevna jer ne uključuje zadavanje parametara koji utječu na izlazne rezultate. Dakle, ne zahtjeva prethodna znanja i omogućuje da znanstvenik koji se prvi put susreće s metodama interpolacije izradi optimalan model za različite potrebe. Karakteristično je da generira zadovoljavajući DMR (integralni – kopno i jezero), što nije karakteristično za druge metode (npr. jednostavni kriging je jedna od najboljih metoda interpolacije za podatke prikupljene fotogrametrijom, a najmanje je pogodna za podatke prikupljene batimetrijom).

Kod geostatističkih metoda razlike između trodimenzionalnih prikaza su značajne. Međutim, za razliku od determinističkih metoda, niti jedna metoda ne stvara ekstremne pogreške. Većina metoda pokazuje nedostatke kod generiranja integralnog modela (kopna i jezera). Npr. određena metoda je dobra za visinske podatke prikupljene aerofotogrametrijom i stereorestitucijskom obradom, a loša za podatke prikupljene batimetrijskom izmjerom. Najbolji primjer su metode jednostavni kriging i kokriging (Slika 69). Statističkom analizom utvrđeno je da metoda jednostavni kriging ima najmanju standardnu devijaciju, realno prikazuje kopneni dio Parka, ali u isto vrijeme izrazito je loša za model jezera. Najveće nedostatke pokazuje u priobalnom dijelu te loše interpolira vrijednosti u blizini profila. Razlog je gustoća prikupljanja podataka unutar profila, razmak između profila i, najvažnije, veća standardna devijacija. Da bi se napravio integralni model i izbjegla ekstrapolacija, nužno je koristiti visinske podatke okolnog reljefa, a to rezultira većom standardnom devijacijom visinskih podataka. Vizualno najbolje integralne modele generira metoda obični kokriging. Za druge metode, posebno univerzalni kriging i kokriging, karakteristično je da interpoliraju površine s „neobičnim“ strukturama (javljaju se izražene „barijere“ okomite na padine).

Problem se može djelomično riješiti uklanjanjem trenda iz podataka. Najbolje je pri tome koristiti trend prvog stupnja jer je kod trendova višeg stupnja struktura još izraženija. Primjenom metode rastavnog kriginga najlošije se generiraju površine jezera. Za determinističke metode karakteristična je „grozdasta“ struktura, posebice za inverznu udaljenost. Neobične strukture, kao rezultat zadanih parametara i interpolacijskih funkcija, nisu prikladne za geomorfološka istraživanja. Od determinističkih metoda, najviše sličnosti s najboljim geostatističkim metodama pokazuje multikvadratna metoda.



Sl. 69. Trodimenzionalni prikaz vertikalno raščlanjenijeg dijela PP Vransko jezero



Sl. 70. Piktogram visinskih grešaka po klasama

Slika 70 i tablica 17 prikazuju udio visinskih grešaka dobivenih korištenjem metode unakrsnog vrednovanja. Greška je razlika između izmjerene i procijenjene vrijednosti. Da bi se utvrdile karakteristike grešaka za svaku metodu interpolacije, greške su grupirane u 4 klase: <1 , $1,01-2,5$, $2,501-5$, >5 . Udio grešaka po klasama napravljen je pomoću GIS funkcije upit (po atributu i lokaciji) za 15542 točaka koje su prikupljene fotogrametrijskom izmjerom i odnose se na područje unutar PP Vransko jezero. Analizom grešaka mogu se

uočiti značajne razlike između metoda interpolacije. Kod determinističkih metoda najveći udio (8,05%) pogrešaka preko 5 metara ima lokalna polinomna metoda (Tablica 17). Usporedbom s trodimenzionalnim prikazima lako se može zaključiti da se metodom najviše zaglađuju površine na vertikalno raščlanjenijim područjima (jaruge Mernjača i Mednjača) (Slika 70). Za razliku od lokalne polinomne, metoda koja ima najmanje pogrešaka preko 5 metara (1,35%) i najveći udio grešaka (76,18%) do 1 metra je multikvadratna metoda. Jedna od najkorištenijih metoda u svijetu (Li i Heap, 2008), inverzna udaljenost, ukazuje na nedostatke kvalitete interpolacijskog algoritma na područjima gdje je reljef vertikalno raščlanjeniji (Slika 70). Udio grešaka do jednog metra manji je za 20% od multikvadratne metode, dok 966 (od 15542) točaka ima pogrešku veću od 5 metara. Zadovoljavajuće rezultate pokazuje metoda splajn s tenzijom, jer broj točaka s pogreškom do 1 metra iznosi 10246 (od 15542).

Kod geostatističkih metoda, razlike u pogreškama preko 5 metara (sferni teorijski model) kreću se od 0,959 (jednostavni kriging) do 9,626% (obični kriging). Razlog velikog broja grešaka kod metode obični kriging je usporedba podataka na većoj udaljenosti (Tablica 10). Korištenje veće vrijednosti parametra udaljenosti kod kreiranja semivariograma pozitivno je utjecalo na izradu modela jezera, međutim negativno na izlazne rezultate modela za kopno. Ovaj problem može se riješiti (pri korištenju sfernog teorijskog modela) smanjivanjem udaljenosti. U tom slučaju podatci će se uspoređivati na kraćoj udaljenosti, a sferni model će se bolje uklopiti u izmjerene podatke, posebice tamo gdje je vertikalna raščlanjenost izraženija. Metoda jednostavni kokriging po statističkim parametrima ima drugu najmanju standardnu devijaciju (1,262) (Tablica 13). Međutim, iz standardne devijacije se ne može uočiti raspored i udio grešaka. Analizom grešaka jasno je da metoda nije dobra jer je prevelik udio grešaka u klasi od 1,01 do 2 (37,24%), i u klasi 2,501-5 (14,889%).

S obzirom da je udio grešaka, korištenjem sfernog modela i veće udaljenosti, bio velik, testiran je eksponencionalni teorijski model za metode obični kriging i kokriging. Karakteristično je da, bez obzira na udaljenost na kojoj su uspoređeni podatci (identična kao za sferni teorijski model), broj točaka s pogreškom preko 5 metara rapidno pada (eksponencionalni teorijski model puno bolje se uklapa u visinske podatke s izrazitim varijabilnosti). Za metodu obični kriging udio točaka s pogreškom do 1 metra se smanjuje za 35,485%, a samo 0,952% točaka ima pogrešku preko 5 metara. Metoda obični kokriging ima samo 4 točke s pogreškom većom od 5 metara. Usporedbom trodimenzionalnog prikaza i grešaka za metodu obični kriging, može se zaključiti kako metoda može pokazivati

zadovoljavajuće vizualne rezultate (dvodimenzionalne i trodimenzionalne), ali istodobno biti neodgovarajuća prema pokazatelju pogrešaka (OKK – S).

Tablica 17. Broj i udio grešaka po klasama za određene metode interpolacije

15542	Greška (m)				Greška (%)			
	< 1	1,01-2,5	2,501-5	> 5,01	< 1	1,01-2,5	2,501-5	> 5,01
MI	14787	681	70	4	95,142	4,382	0,450	0,026
OCK (E)	12018	2786	590	148	77,326	17,926	3,796	0,952
OK (E)	6503	4612	2931	1496	41,841	29,674	18,859	9,626
SK (S)	12018	2792	583	149	77,326	17,964	3,751	0,959
OCK (S)	8849	4340	1793	560	56,936	27,924	11,536	3,603
SCK (S)	7054	5789	2314	385	45,387	37,247	14,889	2,477
IDW	8770	3974	1832	966	56,428	25,569	11,787	6,215
LP	8224	3876	2191	1251	52,915	24,939	14,097	8,049
SWT	10246	3535	1286	475	65,925	22,745	8,274	3,056
CRS	9305	3916	1638	683	59,870	25,196	10,539	4,395
MQ	11841	2819	672	210	76,187	18,138	4,324	1,351

Budući da kvaliteta izlaznih rezultata kod stohastičkih metoda, ovisi prije svega o odabiru kriterija prilikom izrade semivariograma (teorijski model, udaljenost, broj susjeda, sektor), napravljena je usporedba 1) kriterija optimiziranih softverom (automatski) i 2) ručno zadanih kriterija za metodu obični kriging i kokriging. Najprije je testirano 11 teorijskih modela s ciljem pronalaska najmanjeg odstupanja i najniže vrijednosti standardne devijacije (softver u većini slučajeva odabire sferni teorijski model, jer je jedan od 4 najkorištenija). Parametre udaljenosti i broja odmak za svih 11 teorijskih modela optimizirao je softver. Najniže vrijednosti standardne devijacije i odstupanja postignuti su s eksponencijalnim teorijskim modelom. Podatci su za metodu obični kriging (83657 točaka) analizirani (uspoređeni) na ukupnoj udaljenosti 14281,2 metra, točnije u 12 klasa s odmakom 1190,1 metar. Doseg je presjekao prag (8947,7) na 14106,6 metara. Standardna devijacija iznosila je 0,897, a maksimalna pogreška 25,11 metara (Tablica 19). Korištenjem sfernog modela za istu metodu, vrijednost standardne devijacije iznosila je 2,483, a maksimalna pogreška 27,44 (Tablica 13).

Tablica 18. Parametri metoda interpolacije

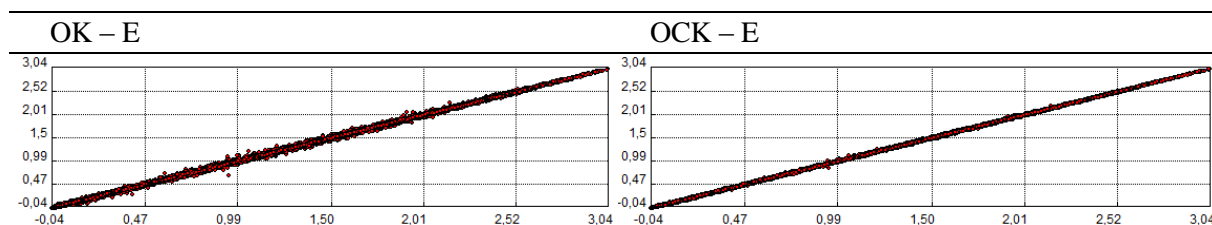
MI*	Jačina	Model	Doseg	Prag	Odstu.*	Odmak	Udaljenost	BO*	BP*
OK		Eksponencijalni	14106,6	8947,7	0	1190,1	14281,20	12	4
OCK		Eksponencijalni	10463,6	7817,9	0	1190,1	14281,20	12	4

*MI – metoda interpolacije, Odst. – odstupanje, BO – broj odmak, BS – broj susjeda, BP – broj podjela

Tablica 19. Rezultati za metodu unakrsnog vrednovanja

MI	Broj izmjerenih točaka	Minimalna vrijednost (m)	Maksimalna vrijednost (m)	Doseg (m)	Zbroj vrijednosti (m)	Srednja vrijednost (m)	Varijanca (m ²)	Standardna devijacija (m)
OK	83657	-25,117	16,772	41,889	92,720	0,001	0,804	0,897
OKK	83657	-10,161	6,707	16,868	28,810	0,000	0,131	0,363
OK	15542	-13,543	14,599	28,142	-234,690	-0,015	1,101	1,213
OKK	15542	-5,477	5,932	11,409	-105,886	-0,006	0,700	0,491

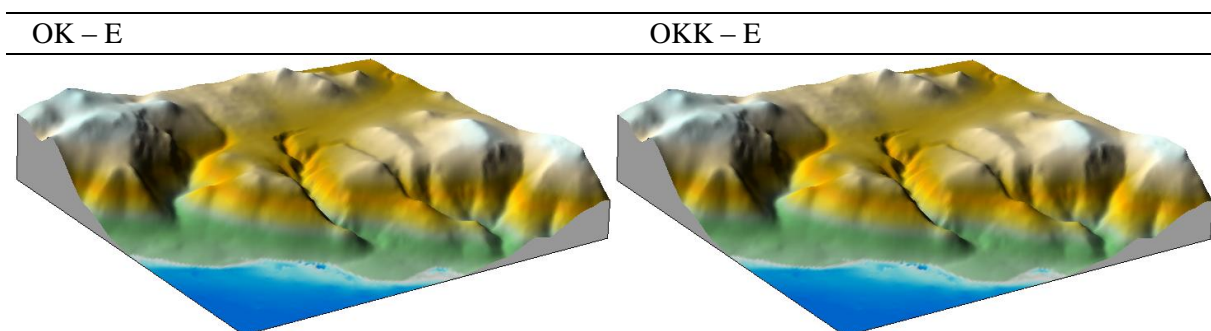
Za metodu obični kokriging standardna devijacija za 15542 točke (eksponencijalni model) iznosila je 0,491, što je za 1,536 (metara) manje od standardne devijacije sfernog modela. Nakon odabira najprikladnijeg teorijskog modela, testiran je sferni model, na način da je traženo najmanje odstupanje i standardna devijacija promjenom vrijednosti parametra udaljenosti. Optimalne vrijednosti standardne devijacije za metodu obični kriging (sferni teorijski model) postignuti su pri udaljenosti od 1800 metara (standardna devijacija iznosila je 0,897, a maksimalna pogreška 25,118). Za razliku od kriterija optimiziranih softverom, proces ručnog pronalaska najniže vrijednosti standardne devijacije i odstupanja je zahtjevniji i vremenski dugotrajniji (zahtjeva opetovano unošenje parametra udaljenosti dok se ne pronađu najniže vrijednosti standardne devijacije). U poglavlju o batimetrijskom istraživanju dokazano je da odabir određenog teorijskog modela i smanjenje udaljenosti može pozitivno utjecati na standardnu devijaciju, međutim negativno na procjenu u područjima za koja nisu izvršena mjerenja.⁷ Visinski podatci prikupljeni aerofotogrametrijskom izmjerom i stereorestitucijskom obradom imaju veću vertikalnu raščlanjenost, te se iz navedenih primjera jasno može uočiti velik utjecaj parametra udaljenosti i odabranog teorijskog modela. Eksponencijalni model se bolje uklapa i prilagođava visinskim podacima s izraženijim skokovima, bez obzira na udaljenost. Međutim, ukoliko se žele dobiti optimalni rezultati za sferni teorijski model mora se smanjiti udaljenost.



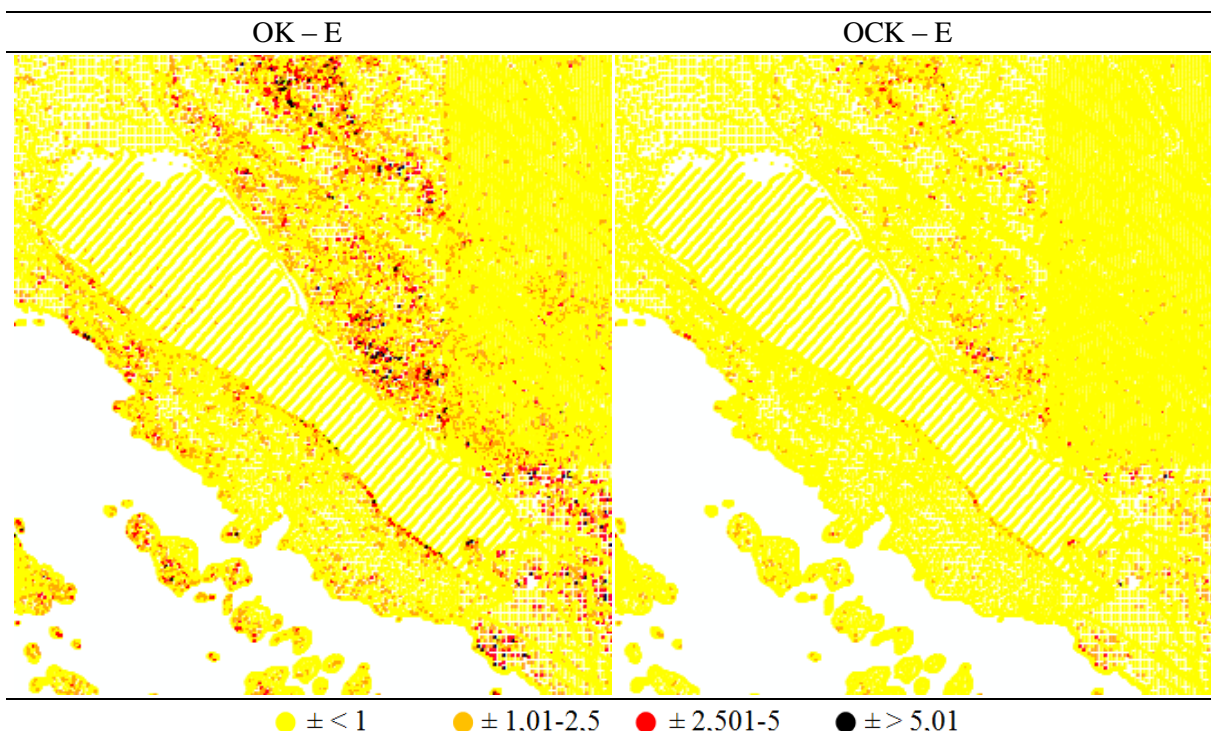
Sl. 71. Pravci regresije mjernih i predikcijskih vrijednosti za šire područje PP Vransko jezero

⁷ S obzirom da su podatci o dubinama prikupljeni na terenu te da su poznate karakteristike reljefa između profila (dno jezera ima slabu vertikalnu raščlanjenost), lako je utvrditi u kojem slučaju određeni parametri kao i procjenjena vrijednost za neuzorkovanu točku, bez obzira na standardnu devijaciju, nisu prikladni. Međutim, kada je vertikalna raščlanjenost reljefa veća, kada su točke prikupljane stereorestitucijskom obradom i imaju drugačiji raspored uzorkovanja, kada je broj točaka manji i kada su nepoznate karakteristike reljefa između točaka, teško je zaključiti je li procijenjena vrijednost za neuzorkovanu točku dobra.

Iz predikcijskih grafova za metodu OKK – E vidljivo je da je odstupanje crvenih točkica od linije najboljeg rješenja gotovo idealno. Maksimalna pogreška u modelu je manja za 10,698 metara od maksimalne pogreške u sfernom modelu i iznosi 5,932. Udio grešaka od 1,01 do 2 metra iznosi 4,382% (najzastupljenije na području jaruge Mernjača, Mednjača i južnom dijelu obale Vranskog jezera). Analizom trodimenzionalnog modela mogu se uočiti manji nedostaci interpolacijskog algoritma u plitkim obalnim područjima.



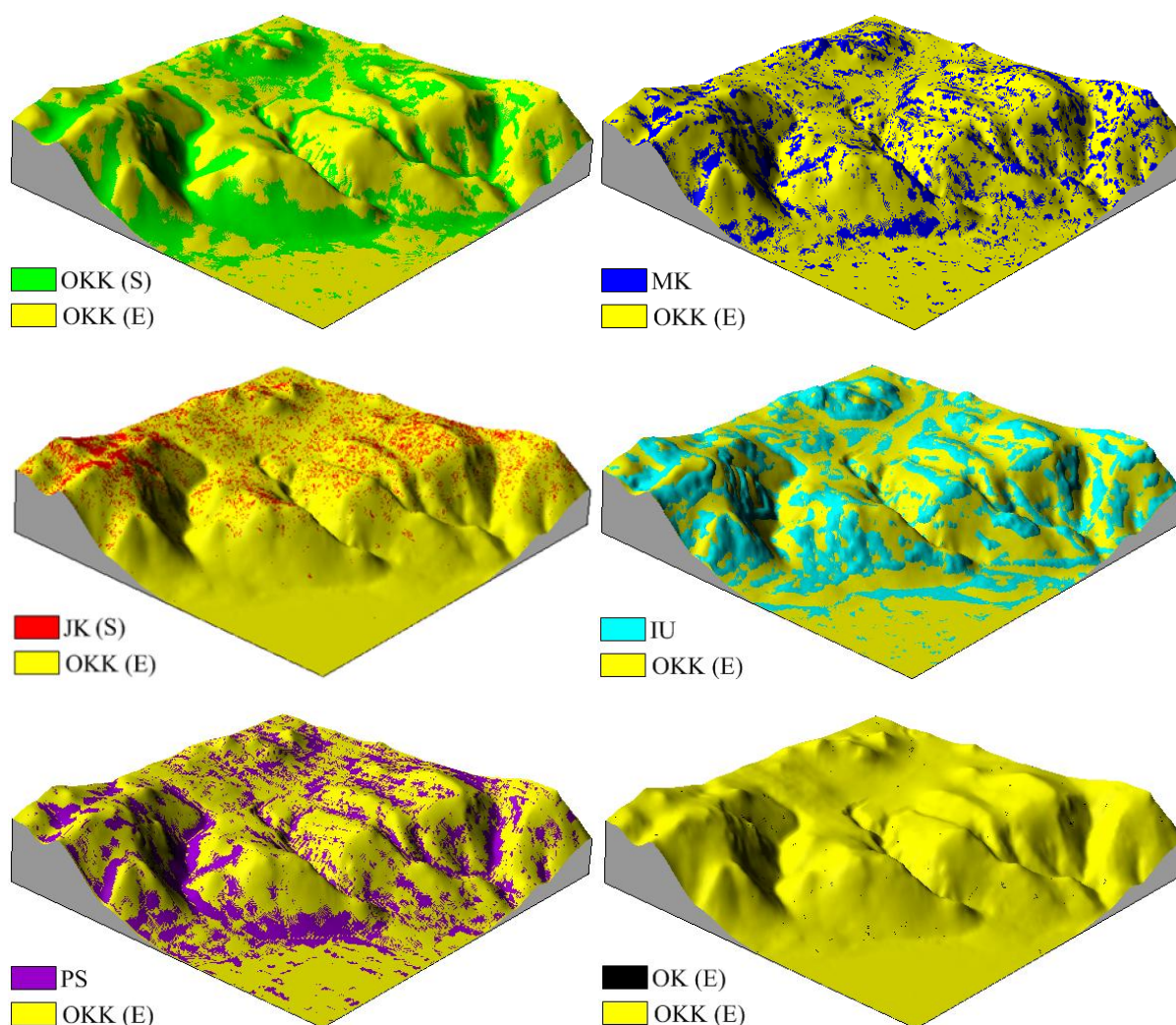
Sl.72. Trodimenzionalni prikaz vertikalno raščlanjenijeg dijela PP Vransko jezero



Sl. 73. Piktogram visinskih grešaka po klasama

Da bi se vizualizirale razlike između generiranih površina determinističkih i geostatističkih metoda interpolacije, međusobno su preklapljeni trodimenzionalni modeli (Slika 74). Cilj je iz grafičkih priloga uočiti razlike i odnose između pojedinih metoda interpolacije, odnosno u kojoj mjeri određena metoda interpolacije odstupa od najbolje metode interpolacije (OKK –

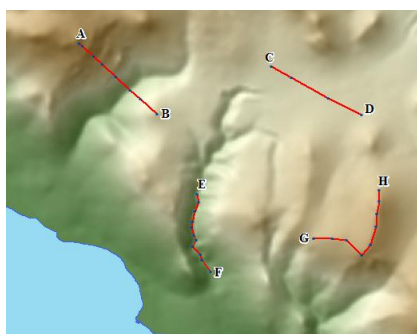
E). Najveće razlike u površinama su između modela dobivenih metodama OKK – E i OKK – S i OKK – E i IDW. Uočljivo je kako metoda obični kriging s korištenim sfernim teorijskim modelom i specifičnim parametrom udaljenosti, zaglađuje površine na područjima gdje je vertikalna raščlanjenost veća. To rezultira i većim visinskim greškama u modelu. Najprikladnija deterministička metoda multikvadratna – ROF ne pokazuje značajnije razlike u površinama (radi se o manjim disperznim površinama). To je karakteristično i za metodu jednostavni kriging, ali u manjoj mjeri. Razlike između OKK – E i IDW su najočitije na linijama oblika (greben) i prijelomnicama, dok se modeli dobro preklapaju na dnima denudacijskih oblika. U tom segmentu metoda prirodni susjed pokazuje najveće nedostatke (profil EF, Slika 75).



Sl. 74. Razlike u površinama između odabranih modela

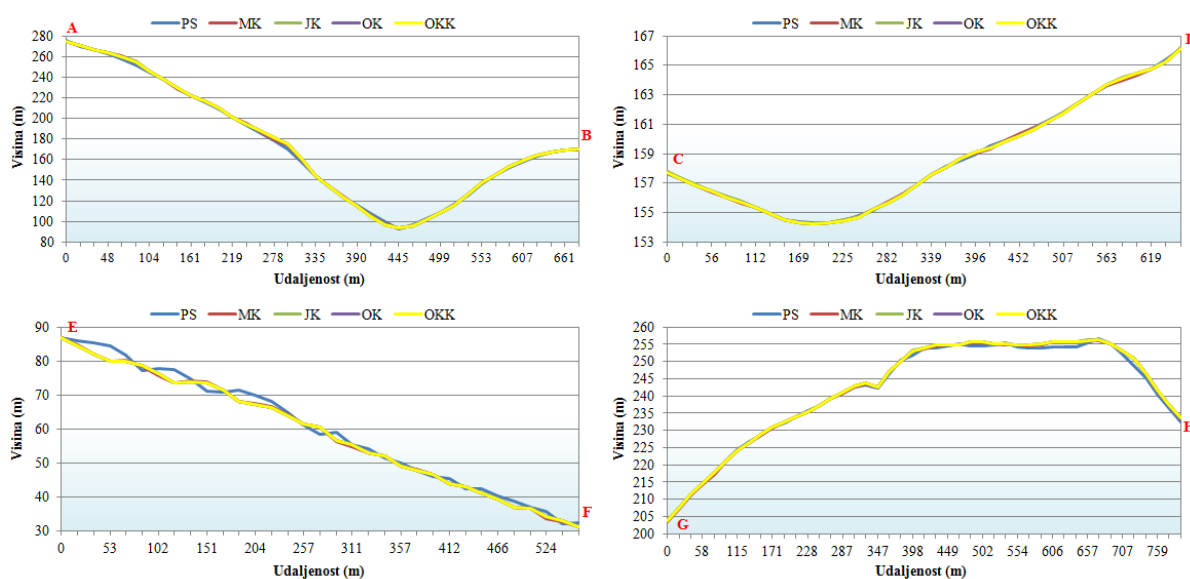
Pet najboljih metoda interpolacije uspoređeno je vizualnom i statističkom analizom profila. Profili su ucrtani na različitim reljefnim oblicima (padine, zaravnjeno područje, dno jaruge, greben) unutar proizvoljno odabranog vertikalno raščlanjenijeg područja PP Vransko

jezero (Slika 75). Cilj je usporedba i utvrđivanje karakteristika metoda interpolacije. S obzirom da se iz grafičkih prikaza profila nisu mogle iščitati značajnije razlike, za svaki profil izračunati su uz pomoć ekstenzije *ET Geowizard* statistički podatci za 3D dužinu, minimalnu i maksimalnu vrijednost visine, ukupni uspon i pad, maksimalni i prosječni nagib uspona i maksimalni i prosječni nagib pada. Oni su omogućili precizno utvrđivanje razlika između 5 najboljih metoda interpolacije (Tablica 20). Prvi profil (AB) dužine 680 metara, ucrtan je okomito na jarugu u području Mernjača. Siječe 8 točaka prikupljenih stereorestitucijskom obradom, gdje najviša točka ima vrijednost 274,2 metra, a najniža 91,1 metar. Drugi profil (CD) dužine 655 metara ucrtan je na zaravnjenijem području (Plovale) i siječe 4 izmjerene točke (najniža ima vrijednost 154,4, a najviša 165,6 metara). Treći profil (EF) siječe 11 izmjerenih točaka, a ucrtan je duž dna jaruge (područje Gradina). Ukupna dužina profila je 562,3 metra (najniža vrijednost visine je 31,1, a najviša 84,9 metara). U trećem profilu javlja se značajnija razlika između metode prirodni susjed i drugih metoda interpolacije, posebice kod visina od 55 do 84,9 m (razlike su i do 10 metara). Razlike se jasno vide i kod statističkih parametara maksimalnog nagiba pada i uspona (nagib je za 3° veći nego kod drugih metoda).



Zadnji, četvrti profil (GH) ucrtan je duž grebena brežuljka Brdo. Siječe 8 izmjerenih točaka, od kojih najniža vrijednost visine iznosi 204,2, a najviša 256,5 metara. Manje razlike između determinističkih i geostatističkih metoda interpolacije mogu se uočiti kod visina oko 255 m.

Sl. 75. Prikaz proizvoljno ucrtanih profila



Sl. 76. Prikaz razlika profila za 5 najboljih metoda interpolacije

Tablica 20. Razlike između 5 metoda interpolacije po profilima

MI	Profil	3D dužina	Maks. visina	Min. visina	Ukupan uspon	Ukupan pad	Maks. nagib uspona	Maks. nagib pada	Prosje. nagib uspona	Prosje. nagib pada
SK	AB	734,685	274,215	93,324	249,431	485,254	31,620	40,465	18,094	22,125
	CD	655,887	166,195	154,236	468,287	187,600	2,986	1,461	1,463	1,077
	EF	565,931	86,718	31,256	32,947	532,984	0,663	12,378	0,411	6,007
	GH	799,855	256,209	203,892	570,841	229,014	14,228	15,666	5,466	6,202
MQ	AB	734,327	274,176	93,347	249,457	484,870	31,435	40,750	18,099	22,118
	CD	655,886	166,221	154,248	468,286	187,600	3,077	1,532	1,465	1,072
	EF	566,057	86,837	31,230	32,962	533,095	2,545	12,953	1,445	6,086
	GH	799,919	256,006	203,537	553,391	246,528	14,204	15,635	5,661	5,754
OCK	AB	734,652	274,187	93,316	249,431	485,221	31,640	40,440	18,093	22,122
	CD	655,886	166,160	154,229	468,286	187,600	2,924	1,510	1,460	1,072
	EF	565,932	86,718	31,258	32,947	532,985	0,661	12,375	0,407	6,006
	GH	799,855	256,172	203,870	570,845	229,010	14,232	15,669	5,467	6,203
OK	AB	734,654	274,186	93,316	249,431	485,223	31,642	40,442	18,094	22,122
	CD	655,886	166,160	154,229	468,286	187,600	2,924	1,510	1,460	1,072
	EF	565,932	86,718	31,258	32,947	532,985	0,661	12,376	0,407	6,006
	GH	799,855	256,171	203,869	570,845	229,010	14,232	15,669	5,467	6,203
NaN	AB	732,553	275,427	92,573	249,034	483,519	30,904	34,832	18,210	22,341
	CD	655,874	166,115	154,273	468,276	187,597	2,365	1,363	1,449	1,034
	EF	566,768	86,873	32,102	70,061	496,707	2,424	15,570	1,743	6,548
	GH	800,108	256,641	203,890	571,149	228,958	13,749	15,584	5,622	6,888

6.4. Odabir prostorne rezolucije

U dokumentu „Specifikacija proizvoda DMR“ (2003) navodi se da prostorna rezolucija za digitalni model visina mora biti 25 metara, a da se za izradu rasterskog modela koristi softver koji postupa s prijelomnicama kao s nepromijenjenim vrijednostima. Nigdje se ne navodi razlog zbog kojeg je preporučena prostorna rezolucija 25 metara. Cilj ovog poglavlja je pronaći najprikladniju prostornu rezoluciju s kojom će se na najadekvatniji način opisati i prikazati reljef PP Vransko jezero. S obzirom da određivanje veličine piksela unutar *grida* (mreže) predstavlja jedan od središnjih problema izrade DMR-a i prostorne analize, postavljena znanstvena pitanja su: 1) koju metodu koristiti za odabir prostorne rezolucije, 2) kako usporediti metode odabira prostorne rezolucije i 3) o čemu ovise izlazni rezultati.

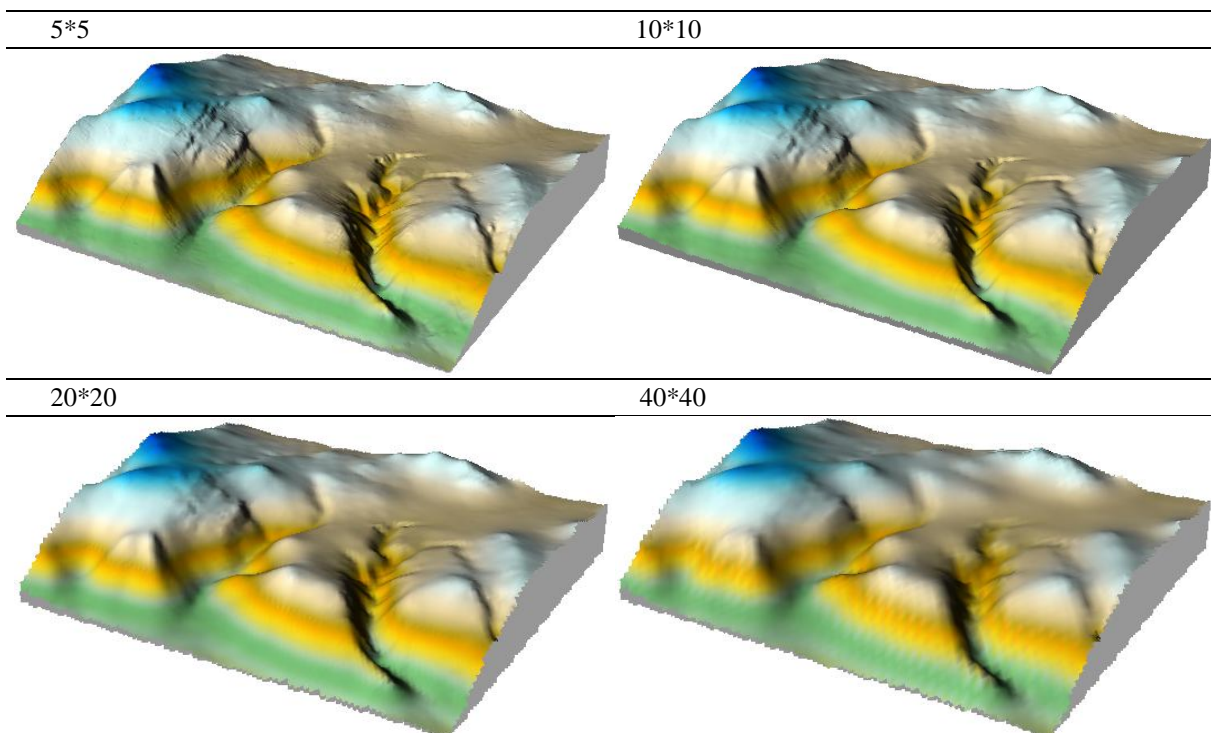
Uspoređeno je 5 metoda za izračun prostorne rezolucije: McCullaghova metoda, metoda kartografskog pravila, metoda kontrolnih točaka, metoda gustoće uzoraka i metoda kompleksnosti terena. Iz formula se može zaključiti da su glavni parametri za većinu metoda

površina i broj točaka.⁸ Za metodu kompleksnosti terena karakteristično je da se veličina piksela računa na temelju dužine infleksijskih linija i broja točaka u njima. Na području Parka, infleksijske linije odnose se na prijelomnice i linije oblika. Duljina prijelomnica unutar Parka iznosi 18,74 km, a linija oblika 110,75 km. Broj visinskih točaka u istima iznosi 6854. Na temelju formula izračunate su vrijednosti veličine piksela za svaku metodu. Iz tablice 21 je uočljivo da između metoda postoje značajne razlike. Raspon vrijednosti za veličinu piksela kreće se od 3,3 metra (metoda kontrolnih točaka), do 42,1 metra (McCullaghova metoda). Postoji povezanost između 3 metode (kartografsko pravilo, gustoća uzoraka i kompleksnost reljefa) gdje su vrijednosti sličnije (bliže vrijednosti 10). S obzirom da je na temelju statističkih izračuna bilo teško odabrati optimalnu metodu, testirana je najbolja metoda interpolacije (OKK – E) s različitim vrijednostima rezolucija, s ciljem utvrđivanja razlika i nedostataka. Razlike i nedostaci su utvrđeni vizualnim putem, pomoću metode sjenčanja reljefa i trodimenzionalnih modela (jednostavnije je uočiti nedostatke pojedine metode).

Tablica 21. Metode odabira prostorne rezolucije

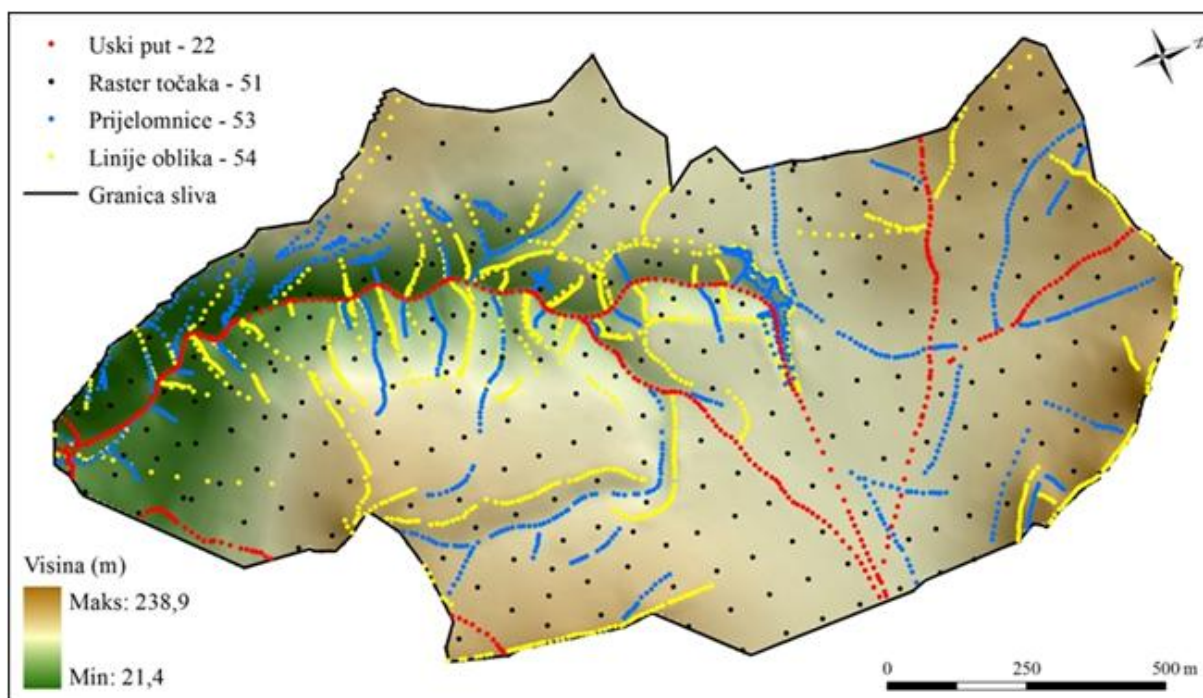
Metoda	Formula	Broj visinskih točaka	Površina (km ²)	Preporučena veličina piksela
McCullaghova	$p = \sqrt{\frac{A}{n}}$	15542	27,591	42,1
Kartografskog pravila	$p = SN * 0,0005$	15542	27,591	12,5
Kontrolnih točka	$p = 0,0791 \times \sqrt{\frac{A}{n}}$	15542	27,591	3,3
Gustoće uzoraka (random)	$p = 0,25 \times \sqrt{\frac{A}{n}}$	15542	27,591	10,5
Gustoće uzoraka (regular)	$p = 0,5 \times \sqrt{\frac{A}{n}}$	15542	27,591	21,1
Kompleksnosti reljefa	$p \leq \frac{l}{2 \times n(\delta z)}$	15542	27,591	9,4

⁸ Površina PP Vransko jezero iznosi 57,456 km², međutim 29,865 km² se odnosi na jezero. Dakle, površina kopnenog dijela Parka iznosi 27,591 km². Unutar navedenog područja broj visinskih točaka koje su prikupljene aerofotogrametrijskom izmjerom i stereorestitucijskom obradom je 15542. Gustoća uzorkovanih točaka iznosi 5633 točke na 1000 hektara.



Sl. 77. Prikaz utjecaja prostorne rezolucije na izlazne rezultate, primjer za metodu OKK – E

Iz trodimenzionalnih grafičkih prikaza jasno je da McCullaghova metoda nije dobra jer previše zaglađuje i generalizira reljefne oblike (Slika 77). Isto tako, vidljivi su nedostaci metoda gustoće uzoraka i kompleksnosti reljefa (prostorna rezolucija 10 metara), posebice na zaravnjenijim područjima gdje se javlja problem „pruskih šljemova“.



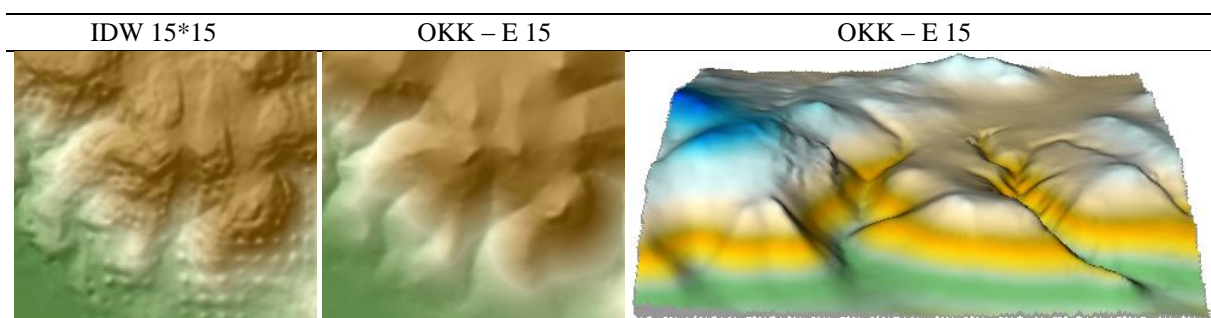
Sl. 78. Primjer slučajnog i pravilnog uzorkovanja (crne točke) u slivu jaruge Mednjača

Bitno je naglasiti da je unutar Parka gustoća uzorkovanja različita. Na slici 78 se može vidjeti primjer slučajnog i pravilnog uzorkovanja (crne točke) u slivu jaruge Mednjača. Na površini od 1,44 km² uzorkovano je 3009 točaka. Od toga se 440 odnosi na uski put (crvene točke), 225 na pravilni raster točaka (crne točke), 1087 na prijelomnice (plave točke) i 1227 na linije oblika (žute točke). Prosječna udaljenost između slučajno uzorkovanih točaka je do 25 metara. Očito je, kad bi se izrađivao samo model navedenog područja, da bi veličina piksela trebala biti 5*5 metara (Slika 77). Međutim, postoje i zaravnjenija područja u Parku gdje je uzorkovanje pravilno, s razmakom između točaka i preko 100 metara (preko 30% točaka). U tim dijelovima i najbolje metode interpolacije pokazuju nedostatke. U slučaju zadavanja manje prostorne rezolucije javlja se problem devalvacije točnosti izvornih podataka.

Dakle, pri izradi modela cijelog područja treba naći kompromis. S obzirom da je za metodu gustoće uzoraka (*random*) rezolucija 10,5, a za *regular* 21,1, te da su rezolucije uspoređivane pomoću trodimenzionalnih modela, zaključeno je da je najbolje da veličina piksela bude 15 metara. U tom slučaju nova formula za izračun prostorne rezolucije bila bi:

$$p = 0,375 \times \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (28)$$

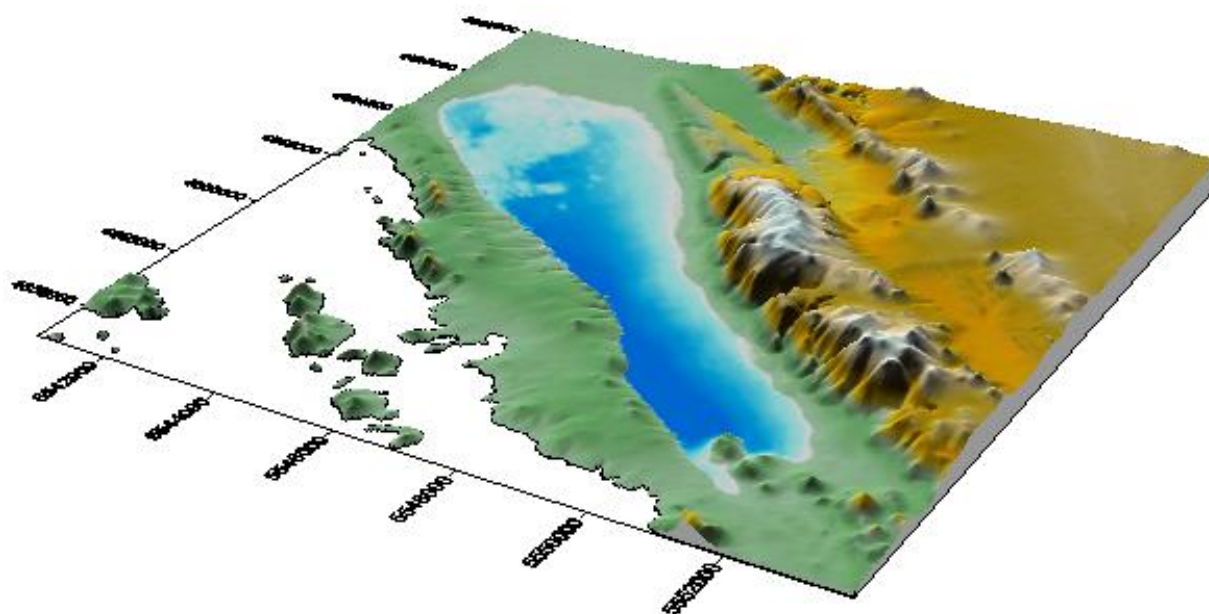
gdje je 0,375 težinski koeficijent koji se odnosi na jednu i pol četvrtinu udaljenosti između izmjerenih podataka. Ova formula odnosi se samo na pet najboljih metoda interpolacije. Dakle, rezolucija od 15 metara nije jednako dobra za sve metode interpolacije, bez obzira što je prilikom izrade modela korišten isti broj točaka. Najbolji primjer devalvacije izvornih podataka (pri rezoluciji 15) je metoda inverzna udaljenost (Slika 79). S obzirom na interpolacijsku funkciju, jasno je da će korištenjem veće vrijednosti prostorne rezolucije doći do uglašavanja udubljenja (pri manjoj rezoluciji je obrnuto jer je veći broj piksela koji se prilagođavaju liniji udubljenja). Odgovarajuća veličina piksela ovisi o gustoći prikupljenih podataka, metodi prikupljanja podataka, vertikalnoj raščlanjenosti i metodi interpolacije.



Sl. 79. Primjer negativnog (IDW) i pozitivnog (OKK – E) utjecaja prostorne rezolucije na izlazne rezultate



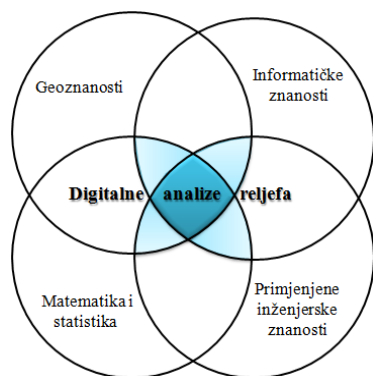
Sl. 80. DOF preklopljen preko optimalnog DMR-a (OKK – E)



Sl. 81. Digitalni model reljefa šireg područja PP Vransko jezero

7. DIGITALNE ANALIZE RELJEFA

Proces kvantitativne analize reljefa poznat je pod nazivom digitalna geomorfometrija⁹ (Pike, 1995; Pike, 2000), digitalna analiza reljefa (Wilson i Gallant, 2000; Hengel, 2003) (*digital terrain analysis* – DTA) ili digitalno modeliranje reljefa (Moore i dr., 1991; Weibel i Heller, 1993; Li i dr., 2005) (*digital terrain modeling* – DTM). Termin digitalno modeliranje reljefa je stariji i često se u literaturi miješa s pojmom *digital terrain model* (DTM), posebice kad se koriste akronimi navedenih pojmova. Digitalna geomorfometrija kombinira elemente iz nekoliko znanstvenih područja: geoznanosti, primijenjenih inženjerskih znanosti, matematike i statistike te informatičkih znanosti (Pike, 1995) (Slika 82). Li i dr. (2005) definiraju digitalno modeliranje reljefa kao postupak izrade i analize digitalnog modela reljefa u čijoj je osnovi proces matematičkog modeliranja. U takvom postupku, točke predstavljaju uzorke reljefa koje služe za modeliranje i imaju specifičnu točnost, gustoću i raspodjelu. Interpolacijskim i analitičkim metodama dobivaju se kvantitativni kontinuirani podatci o reljefu (visine, nagibi, ekspozicije itd.). Digitalno modeliranje reljefa općenito se može podijeliti u 5 odvojenih faza (Slika 83): 1) prikupljanje podataka – proces prikupljanja visinskih podataka pomoću različitih metoda, tehnika i procedura (uključujući i proces manipulacije podacima: ispravljanje, filtriranje i spajanje); 2) interpolacija – faza odabira najprikladnije determinističke ili geostatističke metode interpolacije. Uključuje primjenu metoda usporedbi metoda interpolacije i odabir najprikladnije prostorne (horizontalne) rezolucije; 3) analiza i vizualizacija – faza korištenja skupa metoda i tehnika za izvođenje morfometrijskih parametara iz izrađenog DMR-a; 4) interpretacija – izdvajanje korisnih informacija o odabranim morfometrijskim parametarima korištenjem različitih metoda i 5) primjena – razvoj odgovarajućih aplikacija za specifične svrhe. Hengel i dr. (2003) iz

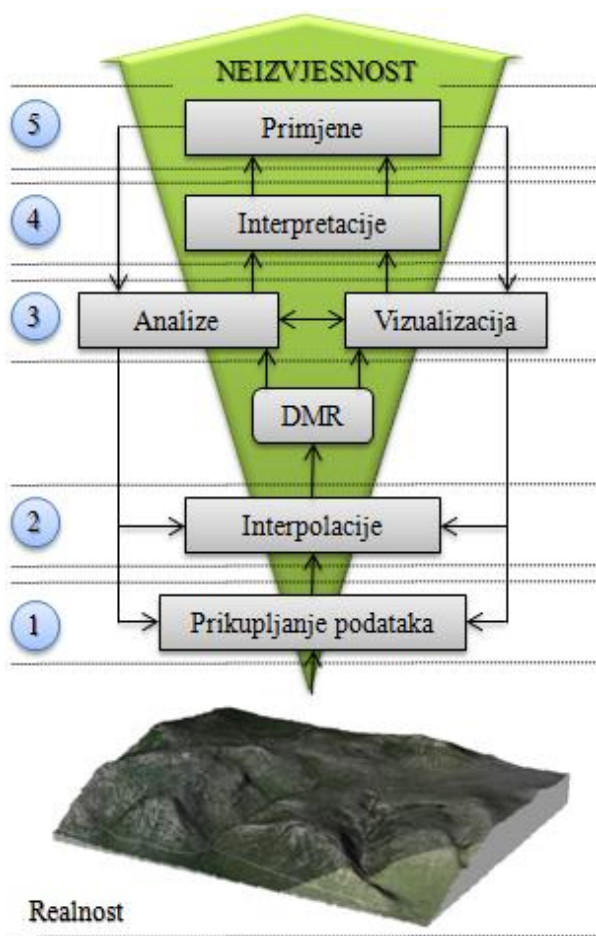


praktičnih razloga uvode pojam digitalna analiza reljefa. Pojam je opravdan iz razloga što većina znanstvenika koristi gotove modele, dakle nije potrebna prva i druga faza modeliranja. Pod pojmom digitalno modeliranje reljefa Hengel i dr. (2003) podrazumijevaju skup interpolacijskih tehnika koje su nužne da bi se izradio model s kontinuiranim vrijednostima visina.

Sl. 82. Položaj DAR-a u drugim znanostima (Pike, 1995)

⁹ Iako su početci razvoja geomorfometrije, kao znanstvene discipline, vezani za 19. stoljeće i rad Alexandra von Humbolta i Carla Rittera (Pike, 2002), rapidni razvoj discipline dogodio se u posljednjih 35 godina zahvaljujući napretku računalne tehnologije i masovne proizvodnje DMR (Pike, 1995; Pike 2000).

Digitalna analiza reljefa predstavlja skup metoda i tehnika koje se koriste za izvođenje morfometrijskih parametara ili varijabli (Shary i dr., 2002), topografskih atributa (Wilson i Gallant, 2000) ili generalnih informacija o terenu na temelju digitalnog modela reljefa. Digitalni model reljefa se koristi za vizualnu i matematičku analizu topografije, krajobraza, reljefnih oblika i hidrografske mreže, kao i za modeliranje površinskih procesa (Dikau i dr., 1995; Giles, 1998; Bishop i Shroder 2000; Millaresis i Argialas, 2000; Tucker i dr., 2001). Tehnologija i metode se rapidno razvijaju i koliko god znanstvenicima olakšavaju postupke analize prostora, istovremeno zahtijevaju kontinuirano interdisciplinarno obrazovanje. U prošlosti su postojale tehnologije i metode koje su bile predodređene za specifične struke,



međutim danas više nema pravila. To ponekad ima negativne posljedice jer je dostupnost i prividna jednostavnost alata rezultirala inflacijom nestručnjaka koji prilikom analiza i kreiranja izlaznih rezultata zanemaruju brojna pravila. Nekoliko faktora ima važan utjecaj na izlazne rezultate digitalne analize reljefa (Florinsky, 1998; Thompson i dr., 2001): vertikalna raščlanjenost reljefa, gustoća uzoraka (uvjetovana metodom prikupljanja podataka), *grid* razmak ili veličina piksela, metode interpolacije (algoritmi), vertikalna rezolucija i algoritmi digitalne analize reljefa.

Sl. 83. Faze digitalnog modeliranja reljefa (prema: Weibel i Heller, 1991; Hutchinson i Gallant, 2000; Oksanen, 2006)

7.1. Geomorfološki parametri

Digitalni geomorfološki parametri najčešće se grupiraju kao primarni i sekundarni ili lokalni i globalni (Wilson i Galant, 2000; Shary i dr., 2002; Olaya, 2009). Međutim, mogu se grupirati i u sljedeće 3 skupine: 1) morfometrijski, 2) hidrološki i 3) klimatološki (Hengel i dr., 2003). Morfometrijski parametri (koji se još nazivaju i primarni) definiraju morfologiju

terena, npr. nagib, ekspoziciju, hipsometriju i zakrivljenost padina. Hidrološki parametri ukazuju na potencijalni rizik od denudacijskih i erozijskih procesa. Klimatološki parametri su varijable na koje utječe faktor reljefa, npr. difuzna, direktna i ukupna radijacija. Oni su najzahtjevniji za izradu jer najčešće nastaju kombinacijom više parametara.

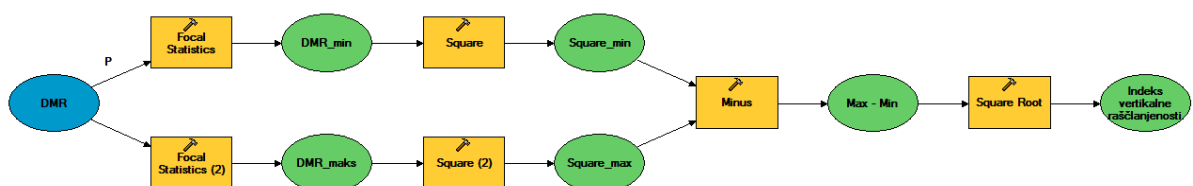
7.1.1. Morfometrijski parametri

7.1.1.1. Vertikalna raščlanjenost

Vertikalna raščlanjenost je važan geomorfološki čimbenik nužan za razumijevanje strukturnih i funkcionalnih značajki okoliša i upravljanje njime (Nellemann i Fry, 1995). Primijenjuje se u različitim znanstvenim disciplinama jer znatno utječe na heterogenost i diverzitet unutar različitih staništa ili ekosustava na maloj udaljenosti (Hoechstetter i dr., 2008). Stoga predstavlja jedan od najvažnijih ekoloških čimbenika u upravljanju ekosustavima s različitih aspekata (Nellemann i Fry, 1995). Koristi se u modeliranju prirodnih prijetnji, npr. lavina (Margreth i Funk, 1999), odrona stijena (Dorren i Heuvelink, 2004) i poplava (Govers i dr., 2000). Detaljnost analiziranja ovog parametra može se provesti na tri razine (Holaus i Hofle, 2010; 2011): mikro (centimetarska preciznost), mezo (metarska) i makro (kilometarska) razini.

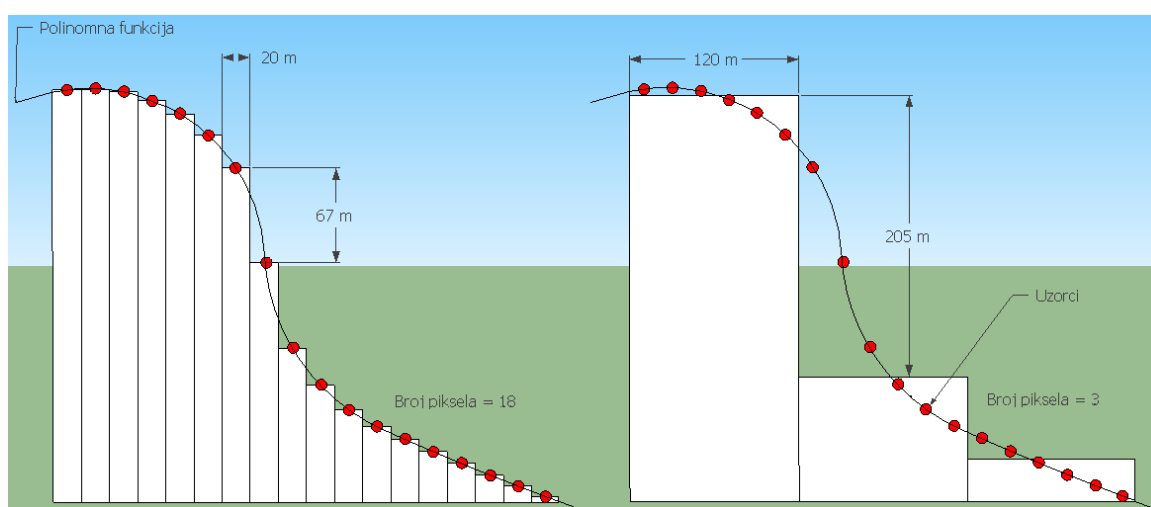
Vertikalna raščlanjenost je morfometrijski parametar reljefa koji predstavlja visinsku razliku između najniže i najviše točke unutar promatranog područja (Lozić, 1995). Može se definirati na nekoliko načina, što znači da nema univerzalne metode i algoritma za izračun (Hobson, 1972; Riley i dr., 1999; Jenness, 2004; Ascione i dr., 2008; Ruszkiczay-Rudiger i dr., 2009; Rashid i Abdul Lani, 2010). Ona ovisi o prostornoj rezoluciji i korištenoj pokretnoj mreži (Slika 85). Za izračun indeksa vertikalne raščlanjenosti korištena je Riley i dr. (1999) metoda i algoritam:

$$IVR = \sqrt{(DMR_{\max})^2 - (DMR_{\min})^2} \quad (29)$$



Sl. 84. Kreirani model u ekstenziji *Model Builder* za izračun indeksa vertikalne raščlanjenosti

Pomoću aplikacije *Model Builder* kreiran je alat za izračun indeksa vertikalne raščlanjenosti (Slika 84). Princip rada algoritma je izračunavanje vrijednosti raščlanjenosti za središnji piksel u pokretnoj matrici 3*3 kvadrata, na temelju okružujućih 8 piksela. Analizom više modela različitih prostornih rezolucija utvrđeno je da prostorna rezolucija utječe na izlazne rezultate indeksa vertikalne raščlanjenosti. Npr. pri rezoluciji 5*5 metara maksimalna vrijednost iznosila je 71,9 m. Dobivene vrijednosti za prostornu rezoluciju 20*20 su od 0 do 127,49 m. Ukoliko se usporede odnosi između maksimalnih vrijednosti i rezolucija u dva modela, jasno je da se maksimalna vrijednost IVR smanjuje sa smanjenjem broja piksela i obrnuto (Slika 85).



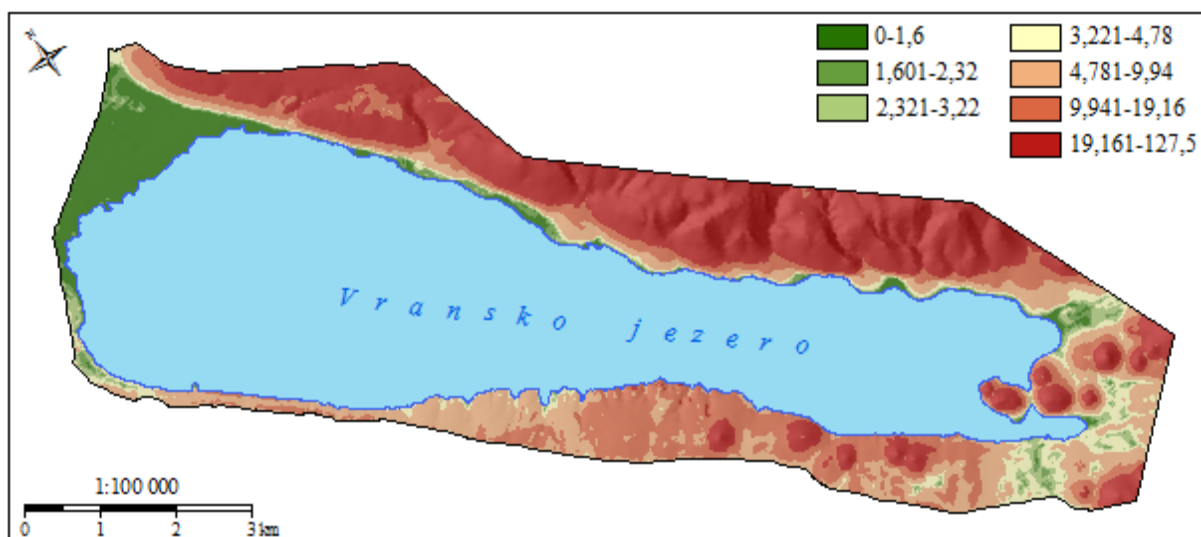
Sl. 85. Utjecaj prostorne rezolucije na izlazne rezultate indeksa vertikalne raščlanjenosti

Kod Rileyja i dr. (1999) maksimalna vrijednost IVR je 4367 m (površina piksela je 1 km²). Razlog je taj što povećanjem piksela odnos visina između susjednih piksela postaje izraženiji (površina je generaliziranija jer je manji broj piksela) (Slika 85). Na primjeru šireg područja Vranskog jezera jasno se može uočiti da je vertikalna raščlanjenost reljefa realnije prikazana ako je broj piksela veći, odnosno ako je njihova površina manja. Dobivene vrijednosti IVR grupirane su u 7 klasa: granice klasa za svaku kategoriju najprije su određene omjerom između prostorne rezolucije modela PP Vransko jezero (20*20 metara) i prostorne rezolucije modela 1*1 kilometar koji je koristio Riley. Riley i dr. (1999) su za klasificiranje raspona vrijednosti IVR koristili metodu jednakih površina, prema kojoj se raspon vrijednosti unutar varijable dijeli na način da svaka klasa ima aproksimativno sličnu površinu. Prva klasa kod Rileyja je od 0 do 80. Formulom $80 : 1000 = x : 20$, lako se izračunava granica klase za prvu kategoriju za model 20*20 metara (od 0 do 1,6 m) itd. S obzirom da su ovom metodom dobiveni nedovoljno precizni rezultati, korištena je Jenksova metoda prirodnih granica (Jenks

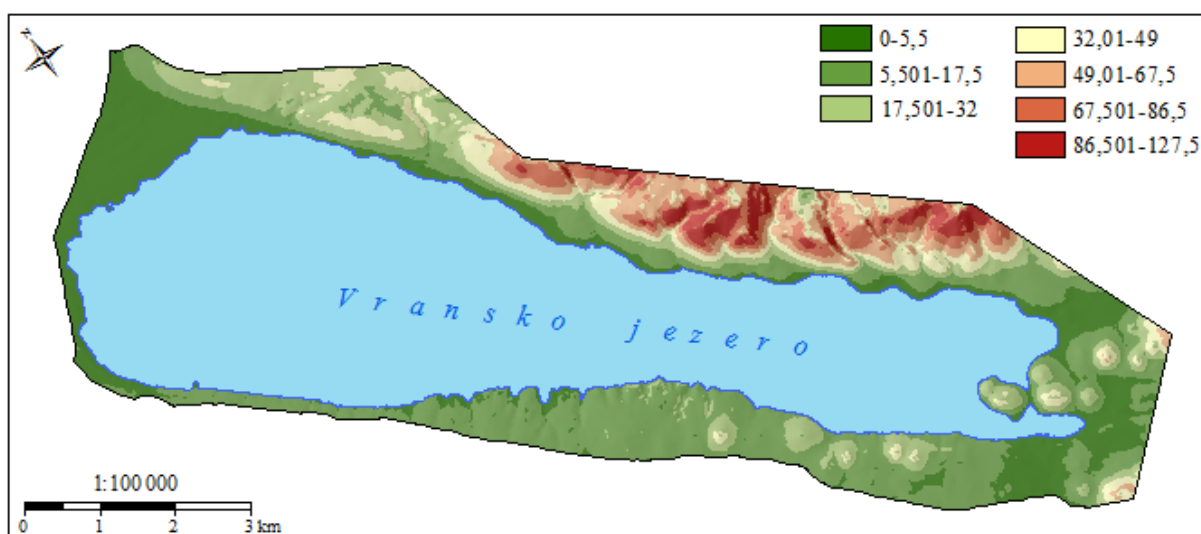
i Coulson, 1963; Jenks, 1967), kojom se željela smanjiti varijanca unutar svake pojedine klase i povećati varijanca između klasa (Tablica 22 , Slike 86 i 87).

Tablica 22. Tipovi i prostorni obuhvat indeksa vertikalne raščlanjenosti

	1*1 km ² (Riley)	20*20 m ² (Riley)	20*20 m ² (Jenks)
Zaravnjeno	0-80	0-1,6	0-5,5
Gotovo zaravnjeno	81-116	1,601-2,32	5,501-17,5
Blago raščlanjeno	117-161	2,321-3,22	17,501-32
Srednje raščlanjeno	162-239	3,221-4,78	32,01-49
Prilično raščlanjeno	240-497	4,781-9,94	49,01-67,5
Jako raščlanjeno	498-958	9,941-19,16	67,501-86,5
Izrazito jako raščlanjeno	959-4367	19,161-127,48	86,501-127,5



Sl. 86. Karta indeksa vertikalne raščlanjenosti (granice klasa prema Riley i dr., 1999)



Sl. 87. Karta indeksa vertikalne raščlanjenosti (granice klasa prema Jenks i Coulson, 1963)

Tablica 23. Klase i prostorni obuhvat IVR (klase prema Jenks i Coulson, 1963)

IVR (u m)	Broj geobjekata	Srednja površina (m ²)	Min površina (m ²)	Max površina (m ²)	Opseg (m)	Ukupna površina (m ²)	Udio (%)
0-5,5	72	87992,01	400	6179025,03	110428,71	6335425,03	23,11
5,501-17,5	53	184812,89	400	5710550,93	150928,89	9795083,28	35,73
17,501-32	84	50827,31	400	2842800,00	111032,63	4269494,16	15,58
32,01-49	110	21669,09	400	1104800,00	86880,00	2383600,00	8,70
49,01-67,5	88	22600,00	400	762000,00	81640,00	1988800,00	7,26
67,501-86,5	65	26270,77	400	513600,00	69360,00	1707600,00	6,23
86,501-127,5	28	33228,57	400	276400,00	27440,00	930400,00	3,39

7.1.1.2. Nagib

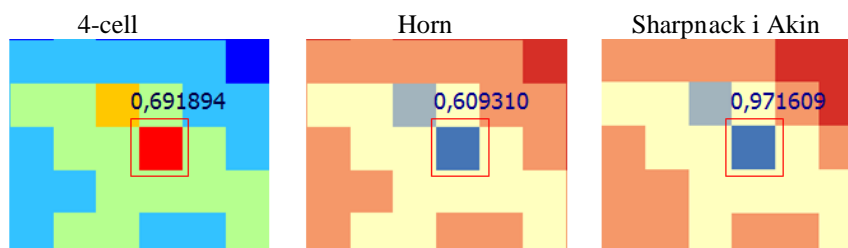
Nagib se često smatra najvažnijim morfometrijskim parametrom, koji se koristi za učinkovitije analiziranje i opisivanje reljefa. Analiza nagiba ima široku primjenu u hidrološkom modeliranju (Band, 1986; Moore i dr., 1991; Jenson, 1991; Tarboton, 1997; Yang i dr., 2002), analizama odrona i klizišta (Duan i Grant, 2000), studijama denudacije i erozije (Dietrich i dr., 1993; Desmet i Govers, 1996a; Mitsova i dr., 1996; Biesemans i dr., 2000) kao i u planiranju korištenja zemljišta (Desmet, Govers, 1996b; Stephen i Irvin, 2000) (Tablica 24).

Tablica 24. Geomorfološka klasifikacija nagiba¹⁰

Nagib (°)	Karakteristike geomorfoloških oblika i procesa
< 2	Ravnica. Kretanja masa se ne zapažaju. Intenzitet spiranja minimalan
2-5	Blago nagnut teren. Spiranje slabo izraženo. Erozijska tla i pojave kliženja mogu biti značajne.
5-12	Nagnuti tereni. Pojačano spiranje i pojave kretanja masa. Do izražaja dolazi kliženje i tečenje materijala. Teren ugrožen erozijom.
12-32	Značajni nagibi. Spiranje je intenzivno. Veoma snažna erozija. Teren jako ugrožen erozijom i pojavom kretanja masa.
32-55	Vrlo strm teren. Dominira odnošenje materijala. Akumulacijski materijal se tek mjestimično zadržava (tanki pokrivač). Padine su stjenovite i pretežito ogoljene.
> 55	Strmci, litice (eskarpmi). Dominira osipanje i urušavanje

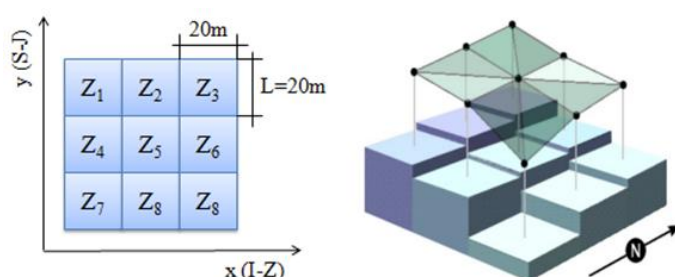
¹⁰ Geomorfološka klasifikacija nagiba padina, temeljena na dominantnim morfološkim procesima koji se aktiviraju ovisno o veličini nagiba, kao i odgovarajućim reljefnim oblicima, prihvaćena je od IGU (International Geographical Union, 1968.)

Nagib se izvodi iz DMR-a koji se temelji na rasterskoj strukturi podataka. Postoje različiti modeli i algoritmi pomoću kojih se izračunava iz visinskih podataka. Točnost algoritama i metoda za izračun nagiba provjerena je primjenom različitih metoda (Hodgson, 1995; Florinsky, 1998; Jones, 1998; Zhou i Liu, 2004). Postoje različiti GIS softveri za izračun nagiba (*SAGA*, *ArcGIS*, *QGIS*, *GRASS*) unutar kojih su integrirani različiti algoritmi.



Sl. 88. Razlike u izračunu nagiba za isti piksel

U *ArcGIS* su integrirane 3 metode: 4-cell (Fleming i Hoffer, 1979; Zevenbergen i Thorne, 1987), Hornova (Horn, 1981; Burrough i McDonnell, 1998), Sharpneck i Akin (Sharpnack i Akin, 1969; Evans, 1979; Florinsky, 1998b) (Slika 88). U *SAGA GIS-u* je integrirano 7 metoda: *maximum slope* (Travis i dr., 1975), *maximum triangle slope* (Tarboton, 1997), *least squares fitted plane* (Horn, 1981), *degree polynom* (Bauer i dr., 1985), *degree polynom* (Zevenbergen i Thorne, 1987), *degree polynom* (Heerdegen i Beran, 1982), *degree polynom* (Harlick, 1983). Korištenjem različitih metoda i algoritama dobivaju se različite vrijednosti za isti piksel (Slika 88). Na slici 90 vidljiv je princip izračuna nagiba različitim metodama za isti (središnji) piksel na temelju okružujućih 8 piksela. O korisniku ovisi koju će metodu i algoritam upotrijebiti i iz kojih razloga. U radu su korištene dvije metode, jedna koju su razradili Zevenbergen i Thorne (1987) i druga, koju je razradio Horn (1981), jer su Hodgson (1995) i Jones (1998) dokazali da imaju najmanju vrijednost kvadratne pogreške. Korištenjem ovih metoda željela se utvrditi razlika u izvođenju površina nagiba. Princip računanja nagiba u obje metode je takav da softver, koristeći metodu 3*3 kvadrata, izračunava maksimalnu stopu promjene vrijednosti visina od središnje ćelije prema okružujućim susjednim ćelijama (Slika 89).



Sl. 89. Metoda 3*3 kvadrata (piksela) (prema: Jenness, 2012)

Mreža koju čine ćelije jednakih dimenzija, poravnana je uzduž geografskih osi x (istok-zapad) i y (sjever-jug) (Slika 90).

Prema 4-cell (Zeuberbergen i Thorne, 1987; Fleming i Hoffer, 1979) metodi, nagib se računa kao prva derivacija visinskih vrijednosti, prema formuli:

$$N = \arctan (\sqrt{G^2 + H^2}) \quad (30)$$

pri čemu je G stopa promjene u smjeru x (istok-zapad) i izračunava se prema formuli:

$$G = \frac{(-Z_4 + Z_6)}{2 * L} \quad (31)$$

dok je H stopa promjene u smjeru y (sjever-jug) i izračunava se prema formuli:

$$H = \frac{(Z_2 + Z_8)}{2 * L} \quad (32)$$

Prema Hornovoj metodi (Horn, 1981; Burrough i McDonnell, 1998), nagib se izračunava prema formuli:

$$N = \sqrt{G^2 + H^2} \quad (33)$$

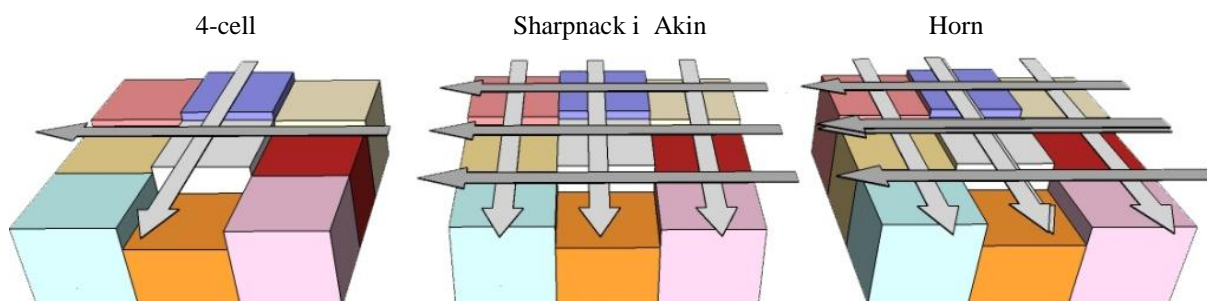
$$N(^{\circ}) = ATAN(N) * 57.29578 \quad (34)$$

pri čemu je G je stopa promjene u smjeru x (istok-zapad) i izračunava se prema formuli:

$$G = \frac{[(Z_3 + 2Z_6 + Z_9) - (Z_1 + 2Z_4 + Z_7)]}{8 * L} \quad (35)$$

dok je H stopa promjene u smjeru y i izračunava se prema formuli:

$$H = \frac{[(Z_1 + 2Z_2 + Z_3) - (Z_7 + 2Z_8 + Z_9)]}{8 * L} \quad (36)$$



Sl. 90. Princip izračuna gradijenta istok-zapad i sjever-jug u mreži 3*3 kvadrata (prema: Jenness, 2012)

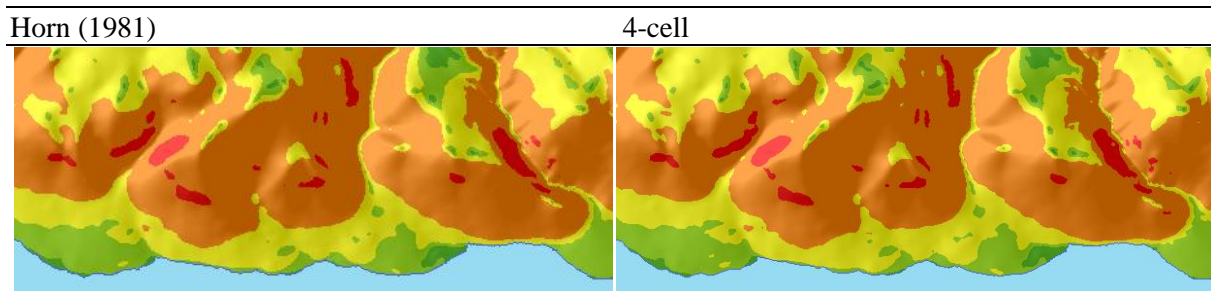
Tablica 25. Klase i prostorni obuhvat nagiba prema Hornovoj (1981) metodi

Nagib (°)	Broj geoobjekata	Srednja površina (m ²)	Min površina (m ²)	Max površina (m ²)	Opseg (m)	Ukupna površina (m ²)	Udio (%)
<2	201	34049,72	2,98	4316306,46	137521,84	6843992,74	24,97
2,01-5	415	17230,84	0,07	1620526,06	242658,31	7150799,67	26,09
5,01-12	274	26183,37	0,02	3390698,49	216858,51	7174242,73	26,17
12,01-32	72	84975,58	39,24	4929283,78	103688,67	6118241,47	22,32
>32,01	23	5426,09	400,00	24800,00	8160,00	124800,00	0,46

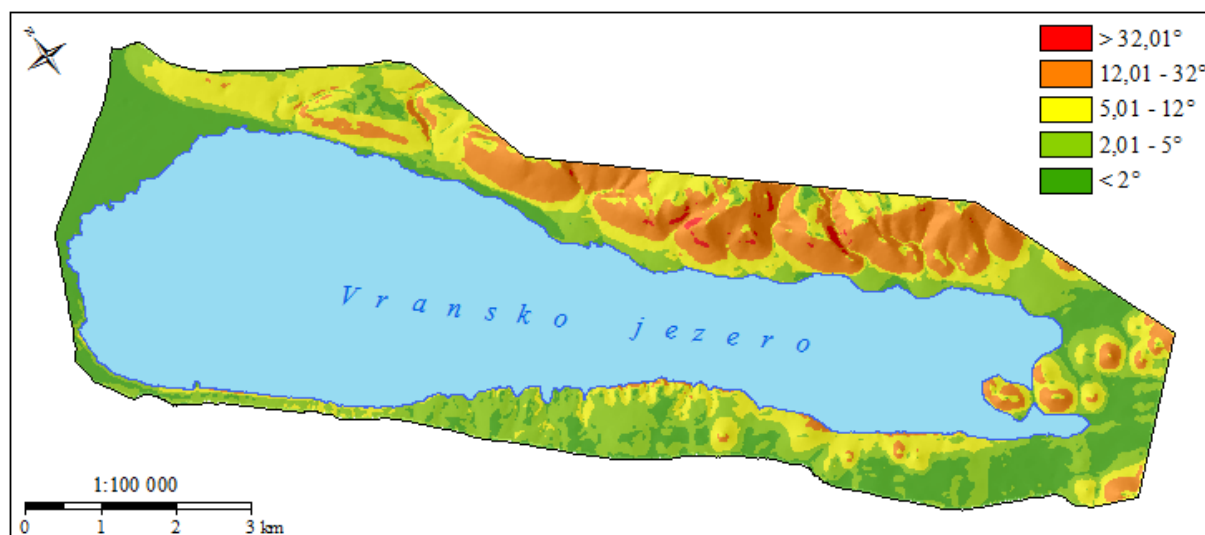
Tablica 26. Klase i prostorni obuhvat nagiba prema 4-cell metodi

Nagib (°)	Broj geoobjekata	Srednja površina (m ²)	Min površina (m ²)	Max površina (m ²)	Opseg (m)	Ukupna površina (m ²)	Udio (%)
<2	251	27197,96	2,98	4299246,68	145901,96	6826686,77	24,90
2,01-5	544	13089,89	0,07	2815053,76	260161,29	7120901,45	25,98
5,01-12	406	17618,57	0,02	3383121,28	231415,60	7153140,01	26,09
12,01-32	108	57223,60	60,28	4959234,09	112420,35	6180148,36	22,55
>32,01	29	4524,14	400,00	24000,00	9560,00	131200,00	0,48

Iako su Hodgson (1995) i Jones (1998) dokazali da su Zevenbergen i Thorne (1987) i Hornova (1981) metoda najprikladnija za izračun nagiba, iz tablica 25 i 26 se može uočiti da postoje razlike između ove dvije metode. Generalno, udio razlika po klasama je gotovo identičan; najveće odstupanje između metoda prisutno je unutar klase 12-32° (0,23% ili 6,19 hektara), a najmanje unutar klase >32 ° (0,64 hektara). Međutim, usporedbom drugih parametara razlike postaju izraženije, posebice za broj geoobjekata. Broj geoobjekata unutar klase od 5-12° u modelu kreiranom prema metodi 4-cell veći je za 132 nego u modelu kreiranom prema Hornovoj metodi. Vizualnom usporedbom modela temeljenih na ove dvije metode ne mogu se uočiti značajnije razlike (Slika 91). Detaljnije usporedbe između metoda moguće su primjenom mjera krajobrazne strukture (poglavlje Mjere krajobrazne strukture).



Sl. 91. Razlike između Hornove i 4-cell metode



Sl. 92. Karta nagiba padina

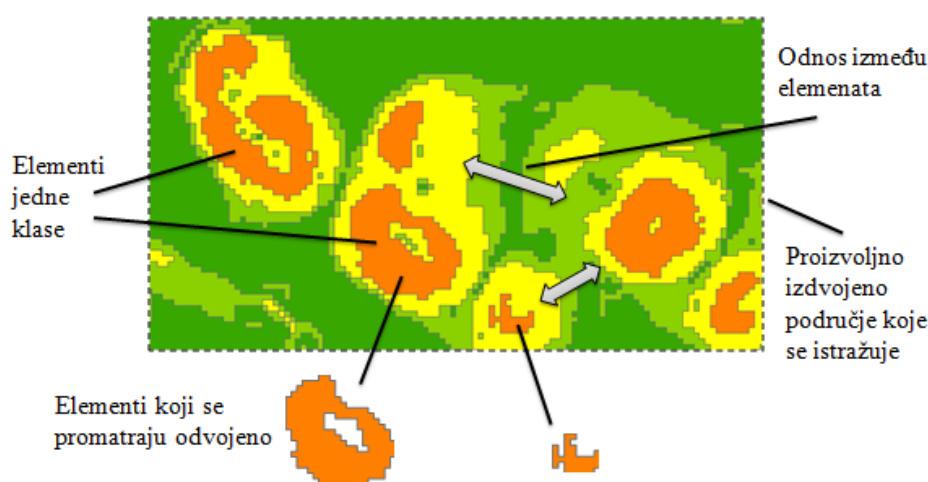
7.1.1.2.1. Mjere krajobrazne strukture

Pet najprikladnijih metoda interpolacije uspoređeno je pomoću mjera krajobrazne strukture (*landscape metrics*) primijenjenih na morfometrijski parametar nagib. Time je uspostavljen novi pristup koji bi se, analogno metodama u krajobraznoj ekologiji, mogao koristiti za istraživanje strukture morfometrijskih parametara na tri razine (element, klasa i cjelina) i kao metoda usporedbe metoda interpolacije.

Karakteristično je da se struktura nagiba mijenja, ovisno o korištenom modelu koji je dobiven različitim metodama interpolacije, algoritmima i pristupima. Metodološko pitanje jest kako usporediti, analizirati i utvrditi razlike između struktura, a time i razlike između metoda interpolacije i korištenih algoritama? Da bi se dobio odgovor, korišteno je 12 mjera strukture: broj elemenata unutar jedne klase (*number of patches* – NP), površina klase (*class area* – CA), srednja veličina elementa (*mean patch size* – MPS), standardna devijacija veličine elementa (*patch size standard deviation*), iznos rubne linije (*total edge* – TE) odnosno cjelokupna dužina rubnih linija koje postoje unutar jednog područja (elementa ili klase), gustoća rubnih linija, srednja dužina rubne linije po elementu, srednji indeks oblika (*mean shape index* – MSI) (stupanj podudarnosti/nepodudarnosti elementa s krugom iste površine), odnos između površine i opsega (*perimeter/area ratio* – PAR), srednja fraktalna dimenzija (*mean fractal dimension* – MFD) tj. u kolikoj je mjeri kompleksan ili isprekidan oblik elementa, indeks diverziteta i indeks ravnomjernosti (*evenness index* – EI) koji pokazuje koliko je ravnomjerna raspodjela klasa (McCarigal i Marks, 1995; McCarigal i dr., 2002). Za

izračun navedenih vrijednosti korištene su dvije ekstenzije, *Patch Analyst* i *V-Late* unutar *ArcGIS-a* i softver *Fragstats*.

Navedene mjere strukture mogu se koristiti za egzaktno utvrđivanje razlika između metoda izračuna vrijednosti nagiba, kao reprezentanta geomorfoloških oblika i procesa. Struktura se odnosi na specifičnu konfiguraciju elemenata odabranog morfometrijskog parametra, koja prikazuje veličinu i oblik elemenata, njihovu prostornu raspodjelu i međusobni odnos. Parametri oblika temelje se na kombinaciji površine i opsega. Unutar hijerarhijske strukture jedne kategorije nagiba element je najmanja homogena jedinica, jedan ili više elemenata čine klasu, a parametar nagiba u cjelini sastoji se od više klasa (Slika 93).



Sl. 93. Primjer odnosa između elementa, klasa i cjeline

Mjere strukture koje su primijenjene u analizi nagiba predstavljaju novu metodu usporedbe metoda interpolacije pomoću koje su egzaktno dokazane sličnosti i razlike između 5 najboljih metoda interpolacije. Generalno, sličnost između geostatističkih interpolacijskih metoda očituje se u svih 11 parametara s obzirom da su razlike u vrijednostima minimalne (Tablice 27, 28, 29, 30, 31, 32).

Primjenom ove metode utvrđena je konfiguracija (veličina, oblik, raspodjela) i prostorni raspored elemenata i klasa nagiba. Također, za razliku drugih primijenjenih metoda u radu, kvantificirana je osjetljivost najmanjih jedinica (elemenata) na prethodno primijenjene metode interpolacije unutar cijelog područja istraživanja.

Površina klase (*class area*) koristi se kao mjera sastava (kompozicije). Jednaka je ukupnoj površini (ha, m ili km) svih elemenata unutar odgovarajuće klase. Računa se prema formuli:

$$CA = \sum_{j=1}^n a_{ij} \left(\frac{1}{10000} \right) \quad (37)$$

gdje je:

a_{ij} = površina (ha) elementa ij (McCarigal i Marks, 1995).

Ukupna dužina rubne linije (*total edge*) jednaka je zbroju dužina (m) svih rubnih segmenata odgovarajuće klase. Dužina rubne linije poistovjećuje se s raznolikošću strukture, no isto tako može značiti prekid u kontinuitetu (Lang i Blaschke, 2007). Računa se prema formuli:

$$TE = \sum_{k=1}^m e_{ik} \quad (38)$$

gdje je:

e_{ik} = ukupna dužina rubne linije pojedine klase (McCarigal i Marks, 1995).

Uz ukupnu dužinu rubne linije koristi se i gustoća rubne linije (*edge density*) koja je jednaka ukupnoj dužini rubne linije klase kroz ukupnu površinu područja istraživanja. Računa se prema formuli:

$$ED = \frac{e_{ik}}{a} \quad (39)$$

gdje je:

e_{ik} = ukupna dužina rubne linije pojedine klase,

a = površina (McCarigal i Marks, 1995).

Parametar omjera površine i opsega (*parametar/area ratio*) predstavlja jednostavnu mjeru kompleksnosti oblika. Karakteristika ove mjere jest da vrijednosti variraju ovisno o površini elementa (McCarigal i Marks, 1995).

Računa se prema formuli:

$$PARA = \frac{P_{ij}}{a_{ij}} \quad (40)$$

gdje je:

p = obujam elementa ij ,

a = površina elementa ij (McCarigal i Marks, 1995).

Fraktalna dimenzija (*fractal dimension*) je mjera za određivanje dužina graničnih linija odnosno njihove kompleksnosti. Pomoću ove mjere definira se iregularnost određenog oblika koji je invarijantan s obzirom na mjerilo, odnosno stupanj kompleksnosti ili isprekidanosti oblika elementa. Vrijednosti su obično manje od 2 (u slučaju da opseg zauzima cjelokupnu

površinu), jer vrijednosti preko 2 indiciraju da se radi o artefaktu. Formula fraktalne dimenzije je:

$$FRAC = \frac{2 * \ln(p_{ij})}{\ln(a_{ij})} \quad (41)$$

gdje je:

p = obujam elementa ij,

a = površina elementa ij (McCarigal i Marks, 1995).

Indeks diverziteta se u prostornim analizama koristi kao mjera informacije i predstavlja složenu mjeru punoće (*richness*) i ravnomjernosti raspodjele (*eveness*) (McCarigal i Marks, 1995). Ovisi o broju različitih klasa i broju elemenata po klasi. Elementi su nosioci informacija i diferencirani su prema njihovoj količini. Što je više klasa i što je sličniji broj elemenata unutar pojedine klase, diverzitet je veći. Shannonov indeks diverziteta pruža informaciju o udjelu i raspodjeli klasa na temelju pojedinačnih udjela površine elemenata unutar svake klase. Odgovara logaritmu broja klasa, ovisno o dubini i raspodjeli površine (Lang i Blaschke, 2007). Računa se prema formuli:

$$H = -\sum_{i=1}^m P_i * \ln P_i \quad (42)$$

gdje je:

H= diverzitet,

P = stupanj pokrivenosti klase i,

m = količina (površina ili broj elemenata) klase,

Ravnomjernost raspodjele (EVEN) računa se prema formuli (Lang i Blaschke, 2007):

$$EVEN = \frac{H}{\ln m} = -\frac{\sum_{i=1}^m P_i * \ln P_i}{\ln m} \quad (43)$$

gdje je:

EVEN = ravnomjernost raspodjele,

H = diverzitet,

P = stupanj pokrivenosti klase i,

m = količina (površina ili broj elemenata) klase.

Indeks oblika (*shape index*) je parametar koji se koristi pri analizi oblika i ukazuje na odstupanje aktualnog oblika jednog elementa od optimalnog oblika kruga (vrijednost 1 predstavlja oblik kruga) (Lang i Blaschke, 2007). Vrijednosti indeksa pokazuju kompleksnost oblika elementa kroz usporedbu sa standardnim oblikom kruga, pri čemu vrijedi pravilo: što je veće odstupanje elementa od standardnog kruga, to je veća vrijednost indeksa oblika. Ovaj indeks koristi se kao jedan od pokazatelja stupnja fragmentacije elemenata krajobraza. Računa se prema formuli:

$$SI = \frac{P}{2\sqrt{\pi} * a} \quad (44)$$

gdje je:

p = opseg,

a = površina (Lang i Blaschke, 2007).

Tablica 27. Mjere strukture za multikvadratnu metodu interpolacije na razini klase

	<2	2,01-5	5,01-12	12,01-32	>32,01
MSI	1,294	1,381	1,464	1,622	1,400
MPAR (m/ha)	1623,509	1581,361	1518,862	1231,021	1300,055
MPFD	1,445	1,446	1,446	1,428	1,429
TE (m)	180880	301320	242800	109920	8960
ED (%)	31,482	52,444	42,259	19,131	1,559
MPE (m)	502,444	437,965	640,633	1235,056	289,032
MPS (ha)	10,092	1,104	1,935	6,815	0,415
NumP	360	688	379	89	31
PSSD (ha)	180,007	6,998	16,444	36,026	0,595
CA (ha)	3632,960	759,640	733,520	606,520	12,880

MSI (*mean shape index*), MPAR (*mean perimetar/area ratio*), MPFD (*mean patch fractal dimension*), TE (*total edge*), ED (*edge density*), MPE (*mean patch edge*), MPS (*mean patch size*), NumP (*number of patches*), PSSD (*patch size standard deviation*), CA (*core are*), SDI (*Shannon diversity index*), SEI (*Shannon evenness index*)

Tablica 28. Mjere strukture za metodu interpolacije OCK – E na razini klase

	<2	2,01-5	5,01-12	12,01-32	>32,01
MSI	1,299	1,350	1,433	1,689	1,481
MPAR (m/ha)	1612,378	1622,723	1527,194	1123,405	1096,048
MPFD	1,444	1,447	1,445	1,423	1,419
TE (m)	168160	279600	231280	104000	8160
ED (%)	29,268	48,664	40,254	18,101	1,420
MPE (m)	509,576	440,315	605,445	1424,658	354,783
MPS (ha)	11,048	1,178	1,916	8,321	0,543
NumP	330	635	382	73	23
PSSD (ha)	184,978	7,486	16,395	39,671	0,641
CA (ha)	3645,800	747,920	731,920	607,401	12,481

Tablica 29. Mjere strukture za metodu interpolacije prirodni susjed na razini klase

	<2	2,01-5	5,01-12	12,01-32	>32,01
MSI	1,286	1,331	1,447	1,592	1,379
MPAR (m/ha)	1628,751	1638,187	1547,724	1260,729	1258,140
MPFD	1,444	1,447	1,447	1,428	1,423
TE (m)	159880	265480	223640	97600	5600
ED (%)	27,827	46,206	38,924	16,987	0,975
MPE (m)	519,091	408,431	601,183	1235,443	280,000
MPS (ha)	11,848	1,154	1,997	7,535	0,404
NumP	308	650	372	79	20
PSSD (ha)	192,545	8,348	11,999	38,315	0,576
CA (ha)	3649,320	750,080	742,840	595,280	8,081

Tablica 30. Mjere strukture za metodu interpolacije jednostavni kriging na razini klase

	<2	2,01-5	5,01-12	12,01-32	>32,01
MSI	1,300	1,355	1,438	1,698	1,481
MPAR (m/ha)	1612,756	1615,918	1524,516	1111,951	1096,048
MPFD	1,444	1,447	1,445	1,423	1,419
TE (m)	169280	281160	231160	103880	8160
ED (%)	29,463	48,936	40,233	18,080	1,420
MPE (m)	506,826	447,707	611,534	1505,507	354,783
MPS (ha)	10,910	1,193	1,939	8,802	0,543
NumP	334	628	378	69	23
PSSD (ha)	183,743	7,527	16,469	58,080	0,641
CA (ha)	3643,841	749,041	732,801	607,361	12,48

Tablica 31. Mjere strukture za metodu interpolacije obični kriging na razini klase

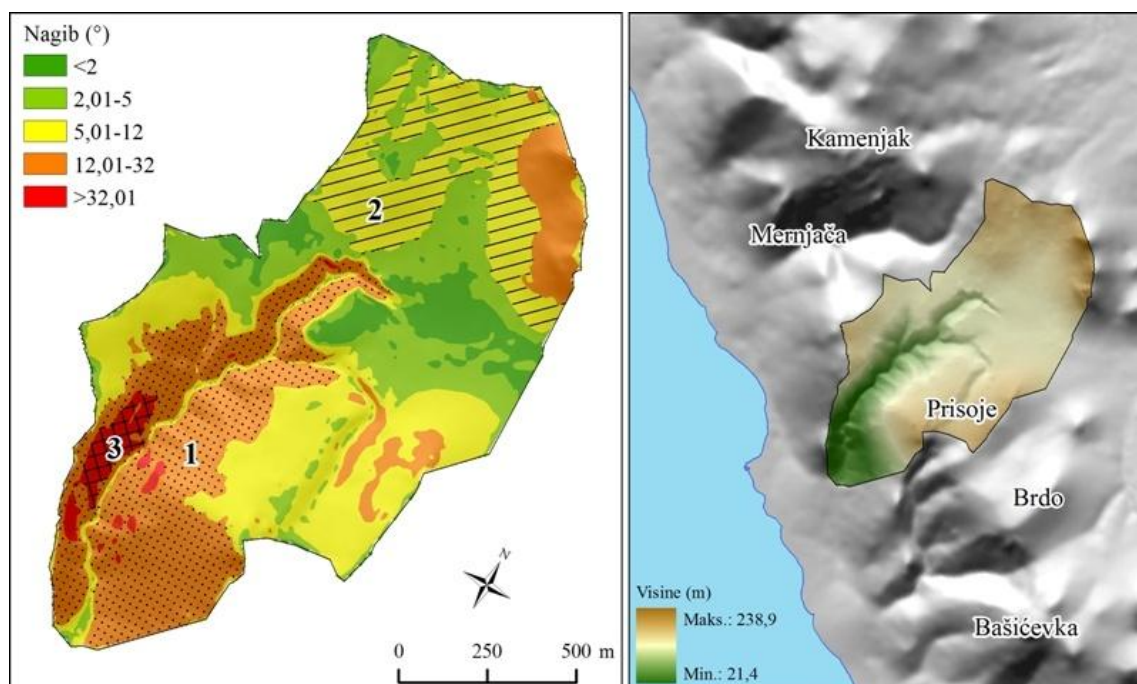
	<2	2,01-5	5,01-12	12,01-32	>32,01
MSI	1,299	1,350	1,433	1,689	1,481
MPAR (m/ha)	1612,378	1622,723	1527,222	1123,405	1096,048
MPFD	1,444	1,447	1,445	1,423	1,419
TE (m)	168160	279600	231280	104000	8160
ED (%)	29,268	48,664	40,254	18,101	1,420
MPE (m)	509,576	440,315	605,445	1424,658	354,783
MPS (ha)	11,048	1,178	1,916	8,321	0,543
NumP	330	635	382	73	23
CA (ha)	3645,801	748,002	731,802	607,440	12,480

Tablica 32. Mjere strukture za 5 najboljih metoda interpolacije na razini istraživanog područja

	SDI	SEI	MSI	MPAR	MPFD	TE	ED	MPE	MPS	NumP	PSSD
OKK	1,067	0,663	1,380	1561,41	1,444	791200	137,707	548,302	3,98	1443	89,541
PS	1,063	0,660	1,367	1586,41	1,445	752200	130,918	526,382	4,02	1429	90,332
MK	1,071	0,666	1,395	1550,06	1,444	843880	146,876	545,495	3,71	1547	87,847
SK	1,068	0,664	1,383	1558,42	1,444	793640	138,132	554,218	4,01	1432	90,281
OK	1,067	0,663	1,380	1561,42	1,444	791200	137,707	548,302	3,98	1443	89,541

7.1.1.2.2. Primjena mjera krajobrazne strukture u analizi nagiba padina

Da bi se detaljnije objasnile mjere strukture u analizi nagiba, analizirano je porječje jaruge Mednjača (Slika 94, Tablica 33). Područje porječja definirano je uz pomoć alata *Hydrology*, odnosno *Flow direction* i *Basin*. Unutar područja površine 1,442 km², određeno je 5 geomorfometrijskih klasa nagiba s ciljem utvrđivanja konfiguracije (veličina, oblik, raspodjela) i prostornog rasporeda elemenata i klasa (Slika 94). Za izradu karte nagiba korišten je DMR dobiven metodom obični kokriging, prostorne rezolucije 10*10 metara.



Sl. 94. Položaj i karta nagiba padina za sliv jaruge Mednjača

Element koji najviše odstupa od optimalnog oblika kruga je element br. 1 (klasa 12,01-32) (Slika 94). Njegov indeks oblika iznosi 5,737 (vrijednost 1 predstavlja oblik kruga). Ovaj element ima najveću površinu (0,38 km²), a omjer površine i opsega (indeks oblika) iznosi 12,54. Vrijednost fraktalne dimenzije je 1,469, što u ovom slučaju ukazuje na kompleksnost elementa. Element br. 2 (dio klase >32) ima vrijednost indeksa oblika 2,499 (iz slike 94 je vidljivo da je odstupanje od optimalnog kruga manje nego za element br. 1. Fraktalna dimenzija iznosi 1,43. Indeks oblika elementa br. 3 iznosi 4,225 a fraktalna dimenzija 1,442. Prosječna površina elemenata po klasama kreće se od 0,221 (2,01-5) do 2,65 (12,01-32) hektara. Najmanja površina elementa za sve klase iznosi 100 m².

Između elemenata se mogu utvrditi i odnosi susjedstva i blizine. Pomoću odgovarajućih algoritama računa se najkraća (euklidska) udaljenost između dva susjedna elementa kao i

njihove površine, dovodeći ih na taj način u odnos. Na taj način, svi elementi između kojih postoje razlike u prostornoj disperziji i raspodjeli, svedeni su na manji broj klastera sličnih obilježja. Najveća prosječna udaljenost utvrđena je između elemenata klase >32,01 i iznosi 38,39 m, a najmanja prosječna udaljenost unutar klase 5,02-12, u kojoj maksimalna udaljenost između dva elementa iznosi 108,16 metara, a prosječna 6,79 metara.

Bitan pokazatelj interakcije između elemenata je indeks koncepta blizine (*proximity index*). Najveću vrijednost IKB ima klasa 12,01-32° (151,06 metara), a najmanju vrijednost (22,66) ima klasa >32,01°. Indeks koncepta blizine računa se prema sljedećoj formuli:

$$PX_{fg} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{d} \quad (45)$$

gdje je:

A = površina,

d = udaljenost (Lang i Blaschke, 2007):.

Tablica 33. Primjena mjera krajobrazne strukture nagiba padina za metodu interpolacije OKK, primjer jaruge Mednjača

	<2	2,01-5	5,01-12	12,01-32	>32,01
MSI	1,357	1,361	1,368	1,722	1,436
MPAR (m/ha)	3062,696	3100,580	3141,982	2539,222	2259,715
MPFD	1,557	1,561	1,564	1,531	1,508
TE (m)	8620	22680	27340	17760	3060
ED (%)	59,774	157,271	189,585	123,154	21,219
MPE (m)	183,4	175,81	248,551	986,671	235,381
MPS (ha)	0,234	0,221	0,484	2,651	0,288
NumP	47	129	110	18	13
PSSD (ha)	0,992	0,871	0,892	0,294	0,668
CA (ha)	10,981	28,521	53,250	47,711	3,750

Analizom klasa mogu se uočiti međusobne sličnosti i razlike. Najveći srednji indeks oblika utvrđen je unutar klase 12,01-32° (1,722), a najmanji unutar klase <2° (1,357), što znači da elementi unutar ove klase imaju pravilniji oblik. Fraktalna dimenzija je gotovo identična za sve klase i kreće se oko vrijednosti 1,5, što znači da su elementi unutar klasa značajnije isprekidani (vrijednost 2 ukazuje na artefakte). Iznos rubne linije je najveći unutar klase od 5,01-12° (27,4 km) što je u ovom slučaju pokazatelj značajnijeg prekida kontinuiteta unutar klase (ovo je karakteristično i za klasu od 2,01-5°). Ovaj podatak potvrđuje i broj elemenata u navedenim klasama koji je veći od 100. Udio klasa u cjelini je različit. Najviše je zastupljena klasa od 5,01-12 ° (36,93%) a najmanje klasa < 2° (2,6%). Analizom cjeline utvrđeno je da

Shannonov indeks diverziteta iznosi 1,345, a indeks jednolikosti raspodjele 0,836 (vrijednost 1 znači da je raspored klasa unutar cjeline). Odstupanje od maksimalne vrijednosti diverziteta (pokazatelj dominacije) iznosi 0,264.

7.1.1.3. Ekspozicija

Ekspozicija je, uz nagib, najčešće korištena varijabla u morfometrijskim analizama (Zhou i Liu, 2002). Ona predstavlja orijentaciju padine s obzirom na strane svijeta. Pri tome se kut određuje najčešće od pravca sjevera u smjeru kazaljke na satu. U konceptualnom smislu, funkcija ekspozicije odnosi se na izračun vrijednosti ekspozicije središnjeg piksela u odnosu na osam susjednih (mreža piksela 3*3). Smjer prema kojem je ploha okrenuta predstavlja ekspoziciju za središnji piksel.

Stopa promjene u x (istok-zapad) smjeru za ćeliju Z_5 izračunava se pomoću formule (Horn, 1981; Burrough i McDonell, 1998):

$$G = \frac{[(Z_3 + 2Z_6 + Z_9) - (Z_1 + 2Z_4 + Z_7)]}{8 * L} \quad (46)$$

Stopa promjene u y (sjever-jug) smjeru za ćeliju Z_5 izračunava se slijedećom formulom:

$$H = \frac{[(Z_1 + 2Z_2 + Z_3) - (Z_7 + 2Z_8 + Z_9)]}{8 * L} \quad (47)$$

Stopa promjene u x (istok-zapad) smjeru za ćeliju Z_5 izračunava se pomoću formule (Zevenbergen i Thorne 1987; Moore i dr.,1991):

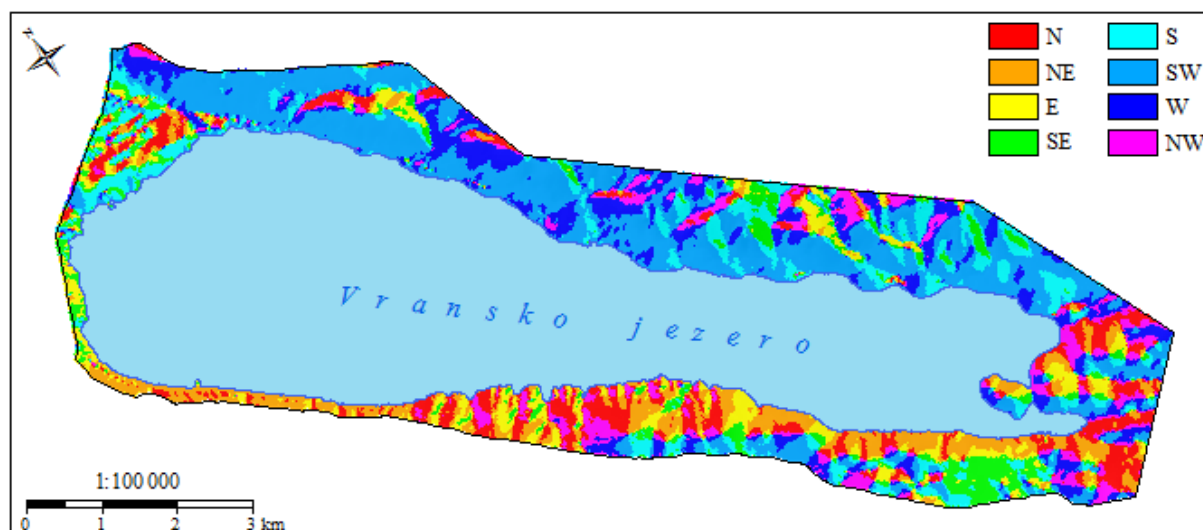
$$G = \frac{(-Z_4 + Z_6)}{2L} \quad (48)$$

Stopa promjene u y (sjever-jug) smjeru za ćeliju Z_5 izračunava se slijedećom formulom:

$$H = \frac{(Z_2 - Z_8)}{2L} \quad (49)$$

Uzimajući stopu promjene u x i y smjeru za ćeliju Z_5 , ekspozicija se izračunava pomoću algoritma:

$$\psi = 180 - \arctan\left(\frac{H}{G}\right) + 90 \left(\frac{G}{|G|}\right) \quad (50)$$



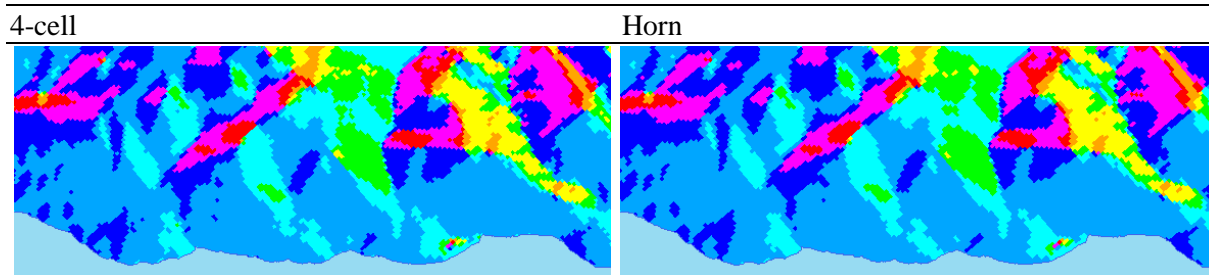
Sl. 95. Karta ekspozicije padina

Tablica 34. Klase i prostorni obuhvat ekspozicije prema Hornovoj metodi

Ekspozi.	Broj geobjekata	Srednja površina (m ²)	Min površina (m ²)	Max površina (m ²)	Opseg (m)	Ukupna površina (m ²)	Udio (%)
N	927	3175,61	0,53	157518,82	222967,63	2947639,45	10,75
NE	422	7641,76	2,06	499003,95	148370,98	3224823,75	11,76
E	329	6435,57	5,11	138909,95	115538,70	2117301,50	7,72
SE	373	5497,57	0,01	426143,74	109228,66	2050593,90	7,48
S	353	8953,77	0,08	258796,32	148378,54	3160679,97	11,53
SW	297	28051,28	22,71	6475831,99	192258,32	8331228,68	30,39
W	355	9823,82	8,92	485230,63	152768,30	3487456,52	12,72
NW	348	6012,51	0,07	142800,00	111568,82	2092352,84	7,63

Tablica 35. Klase i prostorni obuhvat ekspozicije prema 4-cell metodi

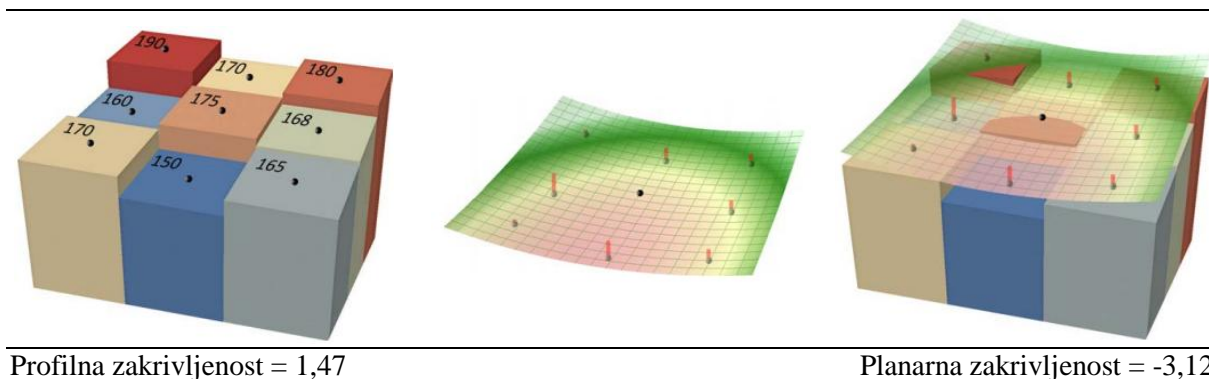
Ekspozi.	Broj geobjekata	Srednja površina (m ²)	Min površina (m ²)	Max površina (m ²)	Opseg (m)	Ukupna površina (m ²)	Udio (%)
N	1076	2767,75	2,98	151118,82	239515,24	2981890,00	10,88
NE	485	6558,07	0,19	473981,15	157947,66	3180665,36	11,60
E	401	5307,76	0,00	136483,17	124721,28	2128412,93	7,76
SE	449	4607,38	0,01	428137,34	118675,60	2068713,63	7,55
S	444	7147,44	0,08	258791,07	160114,64	3173461,55	11,58
SW	372	22228,05	22,71	4688470,21	207734,43	8268833,14	30,16
W	460	7638,61	0,62	443196,62	165163,74	3513759,93	12,82
NW	400	5240,85	0,07	138000,00	117997,42	2096340,08	7,65



Sl. 96. Razlike ekspozicije između 4-cell i Hornove metode

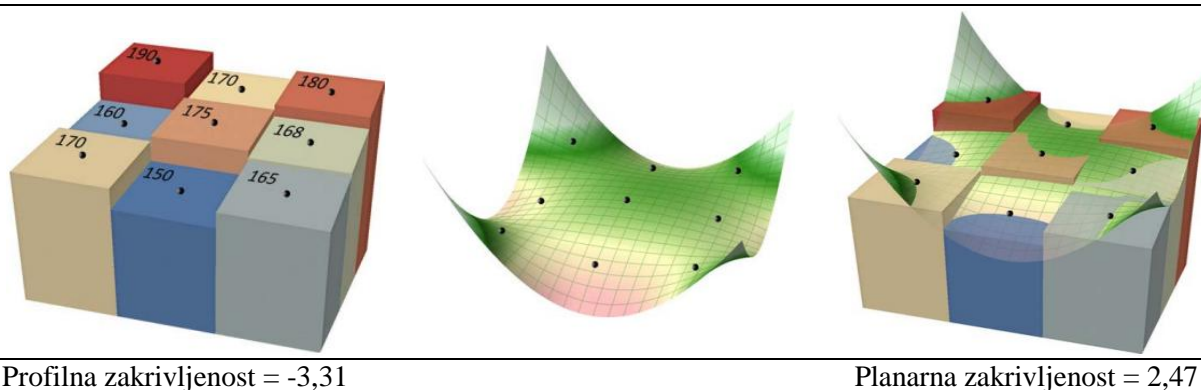
7.1.1.4. Zakrivljenost padina

Zakrivljenost padine je teško definirati iz razloga što je za točku u trodimenzionalnom prostoru moguće izvesti beskonačan broj zakrivljenosti (Ohlmacher, 2007.). Pojam zakrivljenosti padine u GIS okruženju odnosi se na njezin geometrijski oblik, točnije odstupanje oblika od ravnine. Zakrivljenost je inverzna radijusu kružnice i izražava se formulom $k=1/R$. S porastom radijusa kružnice smanjuje se zakrivljenost i obratno. U rasterskim modelima padina je reprezentirana pikselima; što je broj piksela veći a površina manja, zakrivljenost padine će biti vjernije opisana. Međutim, to ujedno ne mora značiti da će analiza zakrivljenosti padina biti optimalnija za geomorfološka istraživanja, jer ona ovisi o svrsi, površini ili razini istraživanja, reljefnom obliku itd. Npr. u modelu 1*1 m, učestalost izmjenjivanja konveksnih i konkavnih dijelova padina može biti toliko velika da se analizom neće moći utvrditi kakvi se procesi odvijaju na padinama¹¹.



Sl. 97. Primjer Evansovog pristupa uklapanja zakrivljene plohe u mrežu 3*3 kvadrata (preuzeto iz: Jenness, 2012)

¹¹ Konveksne padine ili dijelovi padina općenito upućuju na intenzivne denudacijske procese, koji se pojačavaju s dužinom padine (spiranje). Spiranje i puzanje tla prevladavajući su procesi na konveksnim padinama.



Profilna zakrivljenost = -3,31

Planarna zakrivljenost = 2,47

Sl. 98. Primjer Zevenbergen i Thorne (1987) pristupa uklapanja zakrivljene plohe u mrežu 3*3 kvadrata (preuzeto iz: Jenness, 2012)

U literaturi se navodi više vrsta zakrivljenosti: profilna, planarna, longitudinalna, tangencijalna, poprečnog presjeka, ukupna, generalna (Jenness, 2012). Ove zakrivljenosti je teško definirati, stoga se javljaju različite definicije koje su često oprečne. Npr. profilna zakrivljenost prema definiciji Zevenbergen i Thorne (1987) i Moore (1991) je identična definiciji longitudinalne zakrivljenosti prema Woodu (1996). Formula je ista, međutim pristup je drugačiji (Evansov pristup, 1980). Profilna zakrivljenost prema Moore i dr. (1993), Wilson i Gallant (2000), Schmidt i dr. (2003) je po definiciji gotovo identična Zevenbergen i Thorne (1987), međutim razlikuje se po formuli i korištenom pristupu (Evansov pristup, 1980.). U svijetu se za izračunavanje zakrivljenosti najčešće koriste dva pristupa, Evansov (1979) i Zevenbergen i Thorne (1987) (Jenness, 2012). Razlika između ova dva pristupa je u tome što se prema Evansovom pristupu zakrivljena ploha uklapa unutar 9 visinskih točaka pomoću 6-parametarskog polinoma (formula 51), prema kojem ploha ne mora nužno proći kroz sve točke (Evans, 1979) (Slike 97 i 98). Korištenjem metode 3*3 kvadrata, zakrivljenost se računa kao druga derivacija visinskih vrijednosti DMR-a, prema formuli (Evans, 1979):

$$Z = \frac{Dx^2}{2} + \frac{Ey^2}{2} + Fxy + Gx + Hy + I \quad (51)$$

gdje je:

$$D = \frac{[Z_1 + Z_3 + Z_4 + Z_6 + Z_7 + Z_9 - 2(Z_2 + Z_5 + Z_8)]}{3 * L^2} \quad (52)$$

$$E = \frac{[Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9 - 2(Z_4 + Z_5 + Z_6)]}{3 * L^2} \quad (53)$$

$$F = \frac{Z_3 + Z_7 - Z_1 - Z_9}{4 * L^2} \quad (54)$$

$$G = \frac{Z_3 + Z_6 + Z_9 - Z_1 - Z_4 - Z_7}{6 * L} \quad (55)$$

$$H = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 - Z_7 - Z_8 - Z_9}{6 * L} \quad (56)$$

$$I = Z_5$$

gdje je:

L = veličina piksela,

x , y i z = lokalne koordinate,

D , E , F , G , H i I = kvadratni koeficijenti.

Primjer formule profilne zakrivljenosti prema Evansovom pristupu (Moore, 1993; Wilson i Gallant, 2000):

$$\phi = - \frac{(DG^2 + 2GHF + EH^2)}{(G^2 + H^2) \left(\sqrt{1 + G^2 + H^2} \right)^3} \quad (57)$$

Planarna zakrivljenost računa se prema formuli (Moore, 1993; Wilson i Gallant, 2000):

$$\omega = - \frac{(DH^2 - 2GHF + EH^2)}{\left(\sqrt{G^2 + H^2} \right)^3} \quad (58)$$

Prema Zevenbergen i Thorne pristupu (1987) ploha se uklapa između 9 visinskih točaka pomoću 9 parametarskog polinoma, prema kojem ploha mora proći kroz svih 9 točaka unutar mreže 3*3 kvadrata (Slika 98). Hipoteza je da zakrivljena ploha nije točna ukoliko ne prolazi kroz svih 9 točaka. Florinsky (1998) i Schmidt i dr. (2003) su različitim metodama dokazali da je Evansova metoda preciznija, dok Zevenbergen i Thorne (1987) tvrde da je njihova metoda bolja za područja u kojima je reljef raščlanjeniji i zakrivljenost padina veća. Jenness (2012) je dokazao da navedeni pristupi daju oprečne rezultate, te da niti jedna metoda nije pouzdana, jer se radi o procjeni (zakrivljenost se temelji na 9 visinskih točaka unutar mreže 3*3, koje mogu loše reprezentirati stvarni reljef na određenom području).

U *ArcGIS-u* ekstenzija *Spatial Analyst* koristi Zevenbergen i Thorne pristup, dok ekstenzija *DEM Surface Tools* koristi Evansov pristup. U radu su analizirane profilne i planarne zakrivljenosti padina uz pomoć obje ekstenzije. Profilna zakrivljenost iz *Spatial Analysta* je u teoretskom smislu jednaka longitudinalnoj zakrivljenosti u *DEM Surface Tools*, dok je planarna jednaka zakrivljenosti poprečnog presjeka. Razlika je što profilna koristi Zevenbergen i Thorne pristup, a longitudinalna Evansov pristup. Korištenjem metode 3*3

kvadrata, zakrivljenost se računa kao druga derivacija visinskih vrijednosti DMR-a, prema formuli (Zevenbergen i Thorne, 1987):

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (59)$$

gdje je:

$$A = \frac{\left[\frac{(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9)}{4} - \frac{(Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8)}{2} + Z_5 \right]}{L^4} \quad (60)$$

$$B = \frac{\left[\frac{(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9)}{4} - \frac{(Z_2 - Z_8)}{2} + Z_5 \right]}{L^3} \quad (61)$$

$$C = \frac{\left[\frac{(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9)}{4} - \frac{(Z_4 - Z_6)}{2} \right]}{L^3} \quad (62)$$

$$D = \frac{\left[\frac{(Z_4 + Z_6)}{2} - Z_5 \right]}{L^2} \quad (63)$$

$$E = \frac{\left[\frac{(Z_2 + Z_8)}{2} - Z_5 \right]}{L^2} \quad (64)$$

$$F = \frac{(-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9)}{4L^2} \quad (65)$$

$$G = \frac{(-Z_4 + Z_6)}{2L} \quad (66)$$

$$H = \frac{(Z_2 - Z_8)}{2L} \quad (67)$$

$$I = Z_5$$

gdje je:

L = veličina piksela,

x , y i z = lokalne koordinate,

A , B , C , D , E , F , G , H i I = kvadratni koeficijenti.

Profilna zakrivljenost (ϕ) je zakrivljenost padine u smjeru najvećeg nagiba, promatrana u odnosu na zamišljenu vertikalnu plohu koja presijeca padinu u svakom njenom segmentu (Slika 98). Izračunava se prema formuli (Zevenbergen i Thorne, 1978; Moore i dr., 1991):

$$\phi = -2 \frac{(DG^2 + EH^2 + FGH)}{(G^2 + H^2)} \quad (68)$$

Ako je veća od nule, funkcija je konkavna, a ako je manja od nule, funkcija je konveksna.

Točke u kojima funkcija prelazi iz konkavne u konveksnu ili obratno nazivaju se točke infleksije.

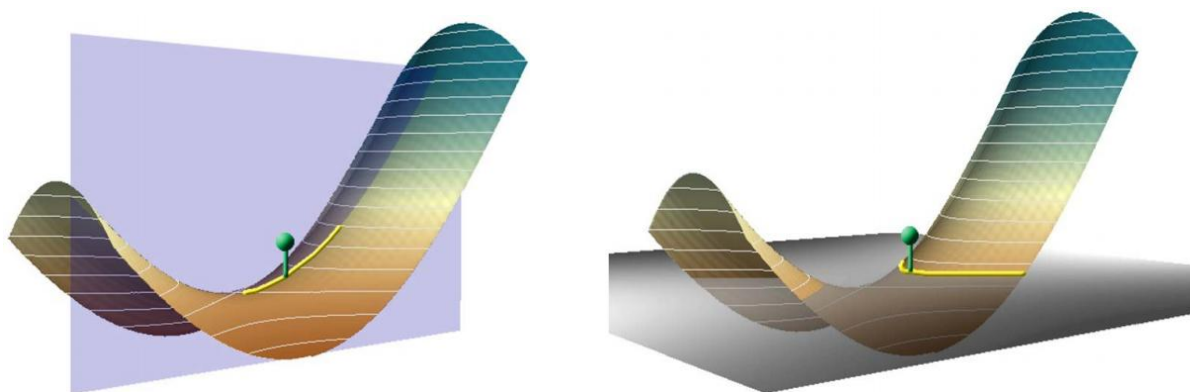
Analizom DMR-a dobiva se numerički niz vrijednosti zakrivljenosti iz kojeg je moguće izdvojiti 3 tipa padina: konkavne, konveksne i pravocrtne. Podjela na konveksne, konkavne i pravocrtne padine koju je uspostavio Saviegar (1952; 1956), a razradio Young (1964; 1971), do danas je ostala temelj analize oblika padina.

Veliki problem u ovom radu predstavljao je odabir metode za određivanje tipa zakrivljenosti padine. U idealiziranim uvjetima, pravocrtne padine su one koje imaju vrijednost zakrivljenosti nula. Dikau (1989) zakrivljenost padina radijusa većeg od 600 m ($k > 0,001666$), na modelu rezolucije 20 m, smatra zanemarivom i takve padine ubraja u pravocrtne. Analogno tomu, za korišteni model rezolucije 20 m, pravocrtnim padinama smatraju se padine radijusa većeg od 600 metara.

Dakle, granične vrijednosti u ovom radu određene su na sljedeći način:

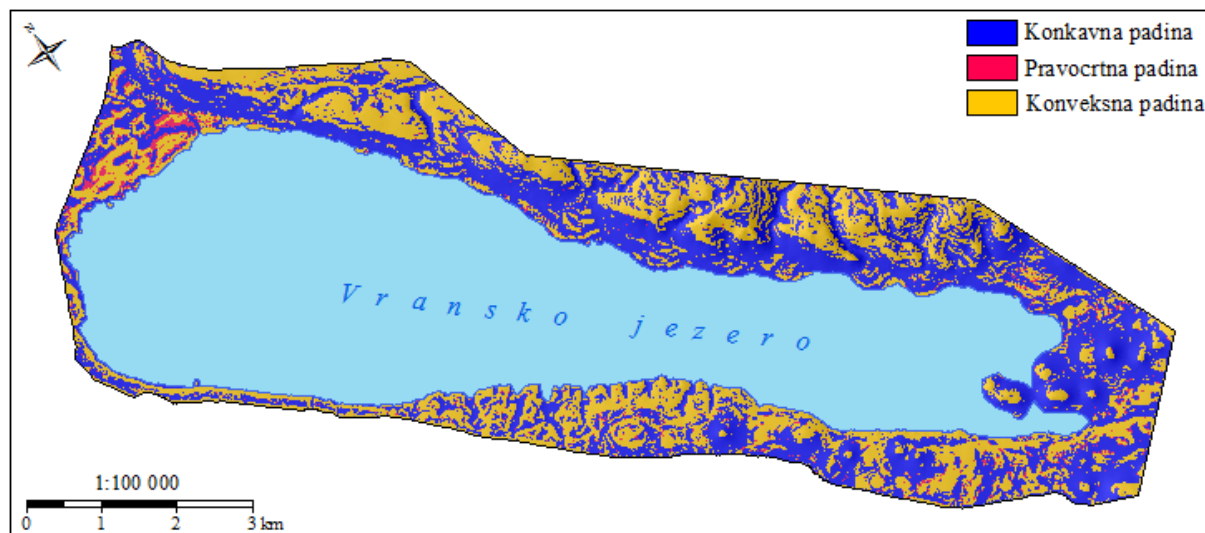
1. granična vrijednost za pravocrtne padine: vrijednosti zakrivljenosti $0 \pm 0,001666$
2. granična vrijednost za konveksne i konkavne padine: vrijednosti iznad $\pm 0,001666$

Kod profilne zakrivljenosti negativne vrijednosti (manje od $-0,001666$) upućuju na konveksne padine, a pozitivne vrijednosti (veće od $+0,001666$) upućuju na konkavne padine. Kod planarne zakrivljenosti je obrnuto.



Sl. 99. Profilna zakrivljenost (lijevo) i planarna zakrivljenost (desno) (preuzeto iz: Jennas, 2012)

Konkavne padine ili dijelovi padina definirane su akumulacijom sedimenata zbog stalne visine podnožja ili zbog intenzivnog procesa spiranja na padini (Dikau i dr., 2004.). U geomorfološkim istraživanjima ove analize mogu se primijeniti za izračunavanje i procjenu trendova endogenih (izdizanje ili spuštanje struktura) i egzogenih geomorfoloških procesa, npr. otjecanja (pomoću planarne zakrivljenosti) ili identificiranja otpornijih stijenskih kompleksa (pomoću profilne zakrivljenosti) (Kennelly, 2009.).



Sl. 100. Karta profilne zakrivljenosti padina

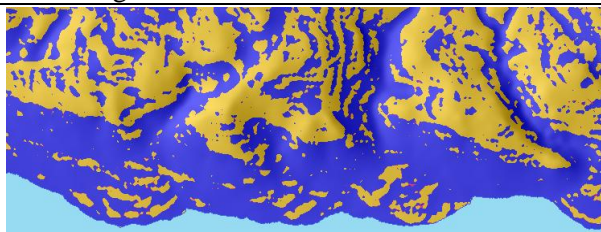
Tablica 36. Tipovi i prostorni obuhvat profilne zakrivljenosti (Zevenbergen i Thorne pristup)

	Broj geobjekata	Srednja površina (m ²)	Min površina (m ²)	Max površina (m ²)	Opseg (m)	Ukupna površina (m ²)	Udio (%)
Konveksne padine	2948	4063,42	0,01	957883,01	816118,72	11978970,81	43,70
Pravocrtne padine	1457	574,70	1,67	25200,00	138464,51	837339,45	3,05
Konkavne padine	2241	6512,31	0,12	8140199,88	824474,92	14594092,22	53,24

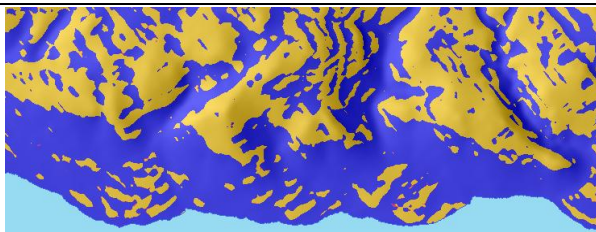
Tablica 37. Tipovi i prostorni obuhvat profilne zakrivljenosti (Evansov pristup)

	Broj geobjekata	Srednja površina (m ²)	Min površina (m ²)	Max površina (m ²)	Opseg (m)	Ukupna površina (m ²)	Udio (%)
Konveksne padine	1096	11087,23	0,51	1466862,39	604371,91	12151602,72	44,33
Pravocrtne padine	1045	513,10	0,01	9600,00	94467,20	536189,09	1,96
Konkavne padine	785	18757,05	0,40	12142741,6	625177,64	14724284,80	53,71

Zevenbergen i Thorne



Evans



Sl. 101. Razlike profilne zakrivljenosti padina između Zevenbergen i Thorne i Evansovog pristupa

Planarna zakrivljenost (ω) je zakrivljenost padine u sekanti okomitoj na smjer najvećeg nagiba (Antonić, 1996; Lozić, 2000; Pahernik, 2007). Schmidt (2003) je naziva i horizontalna zakrivljenost. Može se opisati i kao zakrivljenost hipotetskih izolinija (Slika 99). Pozitivna vrijednost ukazuje na konveksni oblik padine, a negativna na konkavni, dok nulta vrijednost ukazuje na linearnu (pravocrtnu) padinu. Računa se prema formuli (Zevenbergen i Thorne, 1987; Moore i dr., 1991):

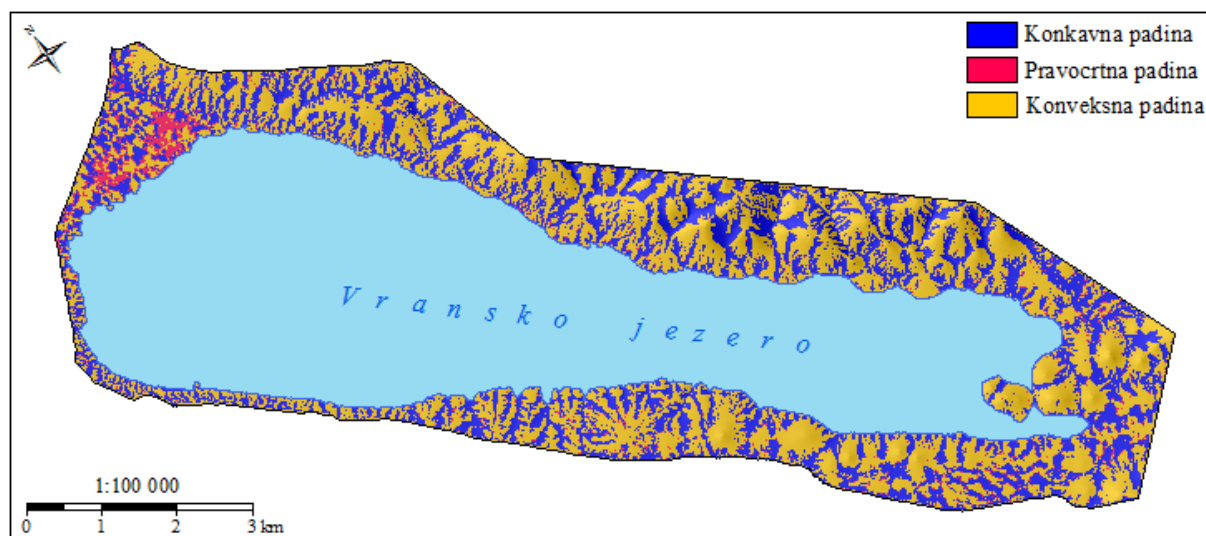
$$\omega = 2 \frac{(DH^2 + EG^2 - FGH)}{(G^2 + H^2)} \quad (69)$$

Tablica 38. Tipovi i prostorni obuhvat planarne zakrivljenosti (Zevenbergen i Thorne pristup)

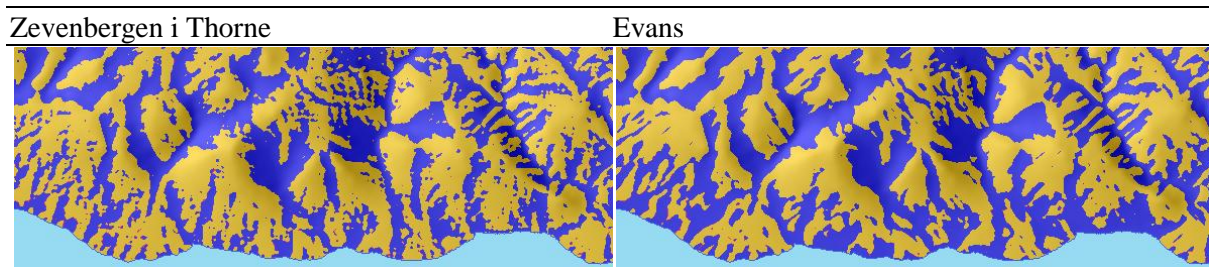
	Broj geobjekata	Srednja površina (m ²)	Min površina (m ²)	Max površina (m ²)	Opseg (m)	Ukupna površina (m ²)	Udio (%)
Konkavne padine	3516	3192,59	0,01	410000,00	887817,42	11225142,78	40,95
Pravocrtne padine	1719	618,12	0,08	131600,00	165007,21	1062539,74	3,87
Konveksne padine	2732	5535,26	0,01	458658,97	912214,43	15122319,96	55,17

Tablica 39. Tipovi i prostorni obuhvat planarna zakrivljenosti (Evansov pristup)

	Broj geobjekata	Srednja površina (m ²)	Min površina (m ²)	Max površina (m ²)	Opseg (m)	Ukupna površina (m ²)	Udio (%)
Konkavne padine	994	11821,84	0,28	2294497,58	660359,48	11750908,35	42,87
Pravocrtne padine	1209	558,57	0,08	50800,00	111644,19	675310,93	2,46
Konveksne padine	799	18755,27	2,15	1227792,70	660050,92	14985457,35	54,67



Sl. 102. Karta planarne zakrivljenosti padina



Sl. 103. Razlike planarne zakrivljenosti padina između Zevenbergen, Thorne i Evansovog pristupa

Usporedbom statističkih parametara u tablicama 36, 37, 38 i 39 i grafičkih priloga (102 i 103) profilnih i planarnih zakrivljenosti vidljivo je da između pristupa postoje značajne razlike. One su najočitije za parametar geobjekti. Npr. broj geobjekata za konkavne padine (planarna zakrivljenost), korištenjem Zevenbergen i Thorne (1987) pristupa, veći je za 2522 od Evansovog. Razlog većeg broja geobjekata u Zevenbergen i Thorne pristupu je princip po kojem metoda uklapa plohu između 9 visinskih točaka pomoću 9 parametarskog polinoma, prema kojem ploha mora proći kroz svih 9 točaka unutar mreže 3*3 kvadrata. Za razliku od Zevenbergen i Thorne pristupa, Evansov pristup generalizira zakrivljenosti, što može biti dobro ukoliko je udaljenost između prikupljenih visinskih točaka manja (npr. 1 metar). Istovremeno, ovaj pristup može rezultirati devalvacijom visinskih točaka ukoliko je udaljenost između točaka veća. Bitno je naglasiti da opravdanost korištenja određenog pristupa (Zevenbergen i Thorne, 1987 ili Evans, 1979) ovisi o svrsi istraživanja (odnosno što se analizom želi postići).

8. RASPRAVA I ZAKLJUČAK

Zahvaljujući razvoju metoda, tehnika i procedura, proces modeliranja reljefa postaje sve brži, međutim, istodobno zahtijeva interdisciplinarna znanja koja su neophodna za razumijevanje i interpretaciju rezultata procesa modeliranja. Brojni su čimbenici koji utječu na rezultate procesa izrade DMR-a. Oni su od iznimnog značaja iz razloga što modeli imaju više specifičnih primjena, kao što su istraživanja, predviđanja, procjene rizika, donošenje odluka u upravljanju okolišem itd.. Upravo primjena modela omogućuje povratne informacije i pokazatelj je kvalitete procesa modeliranja. Svrha modeliranja reljefa jest da je znanstvenik u svakoj fazi modeliranja upućen što i u kolikoj mjeri utječe na izlazne rezultate, s ciljem generiranja najprikladnijeg modela i lakše interpretacije. On mora biti svjestan nedostataka izrađenog modela i ukazati na njih, kako bi buduće generacije pokušale riješiti navedene probleme.

Rezultati ovog istraživanja pokazali su da izlazni rezultati digitalnog modeliranja i analize reljefa ovise o metodama prikupljanja podataka, gustoći uzoraka, metodama interpolacije, osobinama reljefa (prije svega vertikalna raščlanjenost), veličini piksela i primijenjenim algoritmima. Glavni cilj bio je odabrati najprikladnije metode interpolacije i prostorne rezolucije za potrebe geomorfoloških istraživanja. Uspoređeno je 17 metoda interpolacije, 9 determinističkih i 8 geostatističkih. Od 5 najpoznatijih metoda prikupljanja visinskih podataka za izradu modela i usporedbu metoda interpolacije korištena su tri skupa visinskih podataka koji su dobiveni različitim metodama, tehnikama i procedurama prikupljanja podataka: batimetrijskom izmjerom, aerofotogrametrijskom izmjerom i stereorestitucijskom obradom i vektorizacijom izohipsi s HOK-a. Zaključeno je da nema univerzalne metode interpolacije koja pokazuje najbolje rezultate za sva tri skupa podataka, jer izlazni rezultati ovise o metodi prikupljanja podataka. Npr. određena metoda je optimalna za DMR kopnenog dijela, a u istovremeno loša za DMR dna jezera. Također, bez obzira što pojedini autori daju prednost determinističkim, a drugi geostatističkim metodama interpolacije, potrebno je naglasiti da ne postoji najbolja metoda interpolacije jer su sve metode uvjetovane prostorno-vremenskom komponentom. To znači da je rezultat usporedbe i odabira najbolje metode interpolacije trenutno i ovisi o vremenu i okruženju u kojem živimo i djelujemo, tehnologiji koju koristimo za prikupljanje i obradu podataka kao i području koje istražujemo. Ponekad nismo ni svjesni da u vremenu u kojem vršimo određene analize postoje metode, tehnologije koje nam nisu dostupne.

Saznanje da geostatističke metode interpolacije sadrže matematičke funkcije i teoriju vjerojatnoće razlog je da je jedna od hipoteza bila da su geostatističke metode bolji interpolatori od determinističkih metoda interpolacije. To je i potvrđeno, međutim iz teksta se može uočiti kako su razlike između najboljih metoda zanemarive. Potvrđena su saznanja iz svjetske literature da je multikvadratna metoda najbolja radijalna osnovna funkcija, ali i jedna od najboljih determinističkih metoda interpolacije.

Za izradu modela iz batimetrijski prikupljenih podataka uspoređeno je 16 metoda interpolacije, u dvije faze. U prvoj fazi (u kojoj je korištena 12851 točka prikupljena batimetrijskom izmjerom), zbog male vertikalne raščlanjenosti dna jezera, sve metode interpolacije pokazale su dobre rezultate. Primjenom metode unakrsnog vrednovanja i analizom statističkih parametara, zaključeno je da najbolje rezultate pokazuje metoda jednostavni kokriging (standardna devijacija iznosila je 0,197). Raspon vrijednosti standardne devijacije za 16 testiranih metoda, s obzirom na automatski optimizirane parametre, kretao se od 0,197 do 0,249. Zbog karakterističnih izlaznih rezultata i problema ekstrapolacije podataka u prvoj fazi, proces usporedbe metoda interpolacija ponovljen je na 30233 točke unutar PP Vransko jezero. Izlazni rezultati u drugoj fazi bili su značajno drugačiji, a većina metoda pokazala je nedostatke. Kao najbolja metoda interpolacije, prema svim statističkim parametrima, pokazao se obični kokriging. Uz obični kokriging, zadovoljavajući rezultati postignuti su primjenom metoda inverzne udaljenosti, ROF – multikvadratne metode i obični kriging. Standardna devijacija za sve tri metode iznosila je manje od 0,5 m. Navedene metode uspoređene su kroz grafičke prikaze, izračun i usporedbu profila, površine i volumena jezera. Utvrđeno je da nema značajnije razlike između statističkih pokazatelja kod automatskih i ručno zadanih parametara za determinističke i geostatističke metode interpolacije. Međutim, testiranjem metode obični kriging došlo se do zaključka da smanjenje udaljenosti pozitivno utječe na standardnu devijaciju, međutim negativno na aproksimaciju u područjima u kojima nisu vršena mjerenja. Dobivene vrijednosti u tim područjima znatno su premašile vrijednosti okolnih izmjerenih točaka.

Na temelju optimalne metode interpolacije izračunata je površina, opseg i volumen Vranskog jezera, pri vodostaju od 0,4 metara. Površina jezera iznosi 29,865 km², opseg 35,851 km, a obujam 50076679 m³. Prilikom prikupljanja podataka o dubinama zaključeno je da niska frekvencija (30 kHz) nije mogla prodrijeti kroz izrazito gustu isprepletenu „sedimentiranu“ vegetaciju koja je formirala novo čvrsto dno. Drugi nedostatak korištenja niske frekvencije su znatni skokovi u profilima, posebice na mjestima gdje bi frekvencija prodrla kroz vegetaciju ili mulj. Za detaljnije analize trebalo bi koristiti sedimentirane

profilere s frekvencijom do 15 kHz, koji služe za dobivanje detaljnih informacija o slojevima dna (Lafferty i dr, 2006, Pribičević i dr, 2007).

Za izradu modela iz vektoriziranih izohipsi uspoređene su dvije metode interpolacije: TIN i *Topo to raster*. Metode su pokazale značajne razlike u generiranju površina, posebice na zaravnjenijim područjima. Bolje rezultate pokazala je *Topo to raster* metoda, koja je prikladna za izradu modela koji se koriste za geomorfološka istraživanja. Model dobiven *Topo to raster* metodom uspoređen je (analizom morfometrijskog parametra nagiba) s najboljim modelom iz aerofotogrametrijski prikupljenih podataka. Utvrđeno je da kod općih geomorfoloških analiza nema značajnih razlika između metoda.

Za izradu modela iz aerofotogrametrijskih podataka, 17 metoda interpolacije uspoređeno je u dvije faze. U prvoj fazi uspoređeno je 83657 točaka metodom unakrsnog vrednovanja. Analizom statističkih parametara, od geostatističkih metoda najbolje rezultate pokazala je metoda jednostavni kriging, a kod determinističkih multikvadratna. Da bi se dokazala mjera dosljednosti interpolacijskih algoritama, ove dvije metode uspoređene su pomoću metoda podijeljenih uzoraka i *jackknifing*. Generalno, bolje rezultate pokazala je metoda jednostavni kriging, jer je i s 50% manje visinskih točaka dala zadovoljavajuće rezultate. Od determinističkih metoda, najlošije rezultate pokazala je metoda tankoslojni splajn. Uočeno je da metoda loše interpolira površine na područjima gdje je varijabilnost vrijednosti visinskih podataka veća na manjim udaljenostima, ali i kad je udaljenost između točaka izraženija.

U drugoj fazi uspoređeno je 15542 visinskih točaka unutar PP Vransko jezero. Kao najbolja, prema svim parametrima, pokazala se geostatistička metoda jednostavni kriging. Standardna devijacija za navedenu metodu iznosila je 1,124, a maksimalna pogreška 14,86 metara. Analizom statističkih parametara i grafičkim usporedbama (dvodimenzionalnim i trodimenzionalnim) optimalne rezultate za potrebe geomorfoloških istraživanja pokazale su slijedeće metode: prirodni susjed, ROF – multikvadratna i jednostavni kokriging. Od determinističkih metoda posebno treba istaknuti metodu prirodni susjed, jer je u usporedbi s ostalim metodama tehnički najmanje zahtjevna tj. ne uključuje zadavanje parametara koji utječu na izlazne rezultate. Dakle, ne zahtjeva prethodna znanja i omogućuje da znanstvenik koji se prvi put susreće s metodama interpolacije izradi optimalan model. Za ovu metodu karakteristično je da generira zadovoljavajući integralni model, što nije karakteristično za druge metode.

Utvrđeno je da kod geostatističkih metoda postoje značajnije razlike kod automatski i ručno zadanih parametara, posebice za obični kriging i kokriging. Na izlazne rezultate

geostatističkih metoda prilikom kreiranja semivariograma (kovarijance) utječu sljedeći parametri: udaljenost, broj kvadranta, broj susjeda i, posebice, odabrani teorijski model. Od 11 testiranih teorijskih modela najbolje rezultate pokazao je eksponencijalni teorijski model. Najbolje izlazne rezultate pokazale su metode obični kriging i kokriging. Standardna devijacija za metodu obični kokriging iznosila je 0,7, a maksimalna pogreška samo 11,409 metara. Sferni modeli za iste metode pokazuju dobre rezultate kada se smanji udaljenost između točaka. Odabrani trend i transformacija kod geostatističkih metoda utjecali su pozitivno na rezultate standardne devijacije, međutim negativno na aproksimaciju u područjima za koja nisu vršena mjerenja. Kod determinističkih metoda na izlazne rezultate utječu: udaljenost, broj kvadranta, broj susjeda i posebice eksponent udaljenosti.

Analizom pogrešaka uočene su značajne razlike između metoda interpolacije. Kod determinističkih metoda najmanje pogrešaka preko 5 metara (1,35%), i najveći udio pogrešaka (76,18%) do 1 metra ima multikvadratna metoda. Primjenom jedne od najkorištenijih metoda u svijetu, inverzne udaljenosti (Li i Heap, 2008), ukazano je na nedostatke kvalitete interpolacijskog algoritma na područjima gdje je reljef vertikalno raščlanjeniji. Kod geostatističkih metoda razlike u pogreškama preko 5 metara za sferni teorijski model kreću se od 0,959% (jednostavni kriging) do 9,626 (obični kriging). Razlog velikog broja grešaka kod metode obični kriging je usporedba podataka na većoj udaljenosti. Korištenje veće vrijednosti parametra udaljenosti kod kreiranja semivariograma pozitivno je utjecalo na kvalitetu modela jezera, međutim negativno na izlazne rezultate modela za kopneni dio. Ovaj problem riješen je (pri korištenju sfernog teorijskog modela) smanjivanjem udaljenosti. U tom slučaju podatci se uspoređuju na kraćoj udaljenosti, a sferni model se bolje uklapa u izmjerene podatke, posebice tamo gdje je vertikalna raščlanjenost izraženija. Udio grešaka preko 5 metara za najbolju metodu interpolacije, obični kokriging (eksponencijalni teorijski model) iznosi 0,026%, a udio grešaka do 1 metra 95,142%.

Na temelju provedenih analiza, zaključeno je da „nasilno“ poboljšavanje prostorne rezolucije utječe na devalvaciju prikupljenih visinskih točaka i pojavu tzv. „pruskih šljemova“. Na odabir prostorne rezolucije utječu sljedeći parametri: gustoća prikupljenih podataka, metoda prikupljanja podataka, složenost terena (stupanj vertikalne raščlanjenosti) i metoda interpolacije. Osim navedenih metoda preporučuje se izrada i usporedba grafičkih priloga prikaza reljefa (sjenčanje i trodimenzionalni prikazi). Iako je testirano 5 metoda za odabir prostorne rezolucije, utvrđeno je da ne postoji univerzalna metoda interpolacije, bez obzira na metodu prikupljanja podataka, broj izmjerenih točaka i vertikalnu raščlanjenost. Prostorna rezolucija vezana je za interpolacijsku funkciju. Za batimetrijski skup podataka

najprikladnija prostorna rezolucija za najbolju metodu interpolacije (obični kokriging) iznosi 40 metara. Kod aerofotogrametrijskih podataka prostorna rezolucija za najbolju metodu (obični kokriging – eksponencijalni teorijski model) iznosi 15 metara. Istovremeno, ovakva rezolucija nije pogodna npr. za metodu IDW. Za DMR dobiven vektorizacijom izohipsi s HOK-a najbolja prostorna rezolucija iznosi 5 metara.

Korištene mjere krajobrazne strukture koje su primijenjene u analizi nagiba predstavljaju novu metodu usporedbe metoda interpolacije pomoću koje su egzaktno dokazane sličnosti i razlike između 5 najboljih metoda interpolacije. Generalno, sličnost između interpolacijskih metoda očituje se u svih 11 parametara s obzirom da su razlike u vrijednostima minimalne. Primjenom metode krajobrazne analize utvrđena je konfiguracija (veličina, oblik, raspodjela) i prostorni raspored elemenata i klasa nagiba. Također, za razliku od drugih primijenjenih metoda u radu, kvantificirana je osjetljivost najmanjih jedinica (elemenata) na prethodno primijenjene metode interpolacije unutar cijelog područja istraživanja.

Sve provedene analize i zaključci izvedeni iz njih mogu biti korisni za buduća istraživanja metoda prikupljanja podatka, metoda interpolacije, metoda odabira prostorne rezolucije i metoda digitalne analize reljefa. U daljnjoj fazi istraživanja dna Vranskog jezera bilo bi korisno prilikom prikupljanja podataka progustiti profile, ukoliko se koristi jednosnopni dubinomjer, tako da razmak između profila bude maksimalno 50 metara. U tom slučaju odnos između podataka prikupljenih u profilu (u razmaku od 10 metara) i između profila bio bi proporcionalniji. Također, poželjna je usporedba modela dna jezera dobivenih jednosnopnim, višesnopnim i laserskim dubinomjerima. Važno je napomenuti da efikasnije tehnike, kao što su mjerenje višesnopnim ultrazvučnim dubinomjerom ili laserskim dubinomjerom, ne bi bile znatno optimalnije s obzirom na morfologiju dna i velik udio tršćaka i rogozika. Postotak snimljenog dna bi se znatno povećao u odnosu na korištenje jednosnopnog dubinomjera, ali drastično bi se povećala cijena premjera i količina podataka koje treba obraditi. U tom slučaju za procesiranje podataka bi se trebale koristiti radne stanice, iz razloga što je proces generiranja modela Vranskog jezera iz 12851 sa stolnim računalom HP, procesor i7, 6 GB RAM-a bio otežan. Pri eventualnim slijedećim premjerima preporučuje se korištenje frekvencije manje od 15kHz, kako bi se mogla utvrditi debljina i zapremnina sedimenata. S obzirom da je 4,6 % Vranskog jezera prekriveno tršćacima i rogozicima bilo je teško odrediti granicu jezera jer zbog izrazito guste vegetacije laserski dubinomjeri teško dopiru do vodene površine. Da bi se izbjegla ekstrapolacija, u obalnim dijelovima korišteni su visinski podatci prikupljeni aerofotogrametrijskom izmjerom i stereorestitucijskom obradom

pri čemu je prosječan razmak između visinskih točaka u kopnenom djelu PP Vransko jezero iznosio oko 90 metara. Da bi se kvalitetnije interpolirala granica jezera pri različitim vodostajima, bilo bi korisno da razmak između visinskih točaka u kopnenom dijelu bude što manji. Preporuča se aerolaserska metoda prikupljanja podataka ili aerofotogrametrijska metoda, međutim prilikom stereorestitucije razmak između točaka trebao bi biti manji (maksimalno 10 metara).

Metode prostorne interpolacije su vrlo korisne u različitim znanstvenim disciplinama, stoga bi trebale biti češći objekt proučavanja u hrvatskoj geografiji. U svijetu je poznato 42 metode interpolacije (Li i Heap, 2008), a u ovom radu testirano je 17, integriranih unutar *ArcGIS-a*. Tijekom budućih istraživanja bilo bi korisno analizirati metode interpolacije koje su integrirane u druga softverska rješenja (*GS⁺*, *stats*, *gstats*, *geoR* itd.). Na taj način mogli bi se usporediti rezultati određenih metoda interpolacije između dva ili više softvera, te ukazati na egzaktne razlike.

S obzirom da svaka metoda interpolacije daje različiti prikaz, glavni je izazov, na temelju uzoraka, generirati najtočniju moguću površinu, te utvrditi karakter pogrešaka i varijabilnosti procijenjenih vrijednosti testiranjem i usporedbom različitih metoda interpolacije. Međutim, danas je, zahvaljujući razvoju tehnologije, znanstvenicima dostupna metoda (aero i terestričkog) laserskog prikupljanja podataka. Modeli izrađeni ovom tehnologijom mogu imati milimetarsku horizontalnu i vertikalnu točnost (što znači da gotovo realno prikazuju reljef). Postavlja se pitanje hoće li u bliskoj budućnosti metode interpolacije u procesu modeliranja reljefa imati značajniju ulogu ako se primjenom navedene tehnologije može prikupiti do 1000000 točaka u sekundi? Drugim riječima, pitanje je koliku će ulogu imati sadašnje metode usporedbe metoda interpolacije ukoliko se npr. model dobiven iz visinskih podataka prikupljenih aerofotogrametrijskom izmjerom i stereorestitucijskom obradom te korištenjem determinističkih i geostatističkih metoda interpolacije uspoređuje s modelom koji je dobiven terestričkim laserima izrazite preciznosti. Jedan od budućih zadataka u istraživanjima može biti provjera izlaznih rezultata (statističkih, grafičkih itd.) modela dobivenih iz podataka prikupljenih aerofotogrametrijskom izmjerom pomoću izrazito preciznih modela (modeli se međusobno preklapaju te se izračunavaju razlike). Ovakvim pristupom moguće je precizno utvrditi točnosti korištenih interpolacijskih funkcija. Najveći problem metode laserskog prikupljanja podataka je prorjeđivanje podataka, jer količina podataka nadilazi kapacitet uobičajene hardverske i softverske opreme (Basa i Juraj, 2011). Istovremeno, modeli postaju toliko precizni da će se morati odrediti standardi mjerila

proučavanja reljefa od mikro do makro razine. Mjerilo će biti uvjetovano razinom istraživanja koje će biti povezano s gustoćom prikupljenih točaka na određenoj površini.

Na izlazne rezultate digitalnih analiza reljefa, osim kreiranog DMR-a, najznačajniju ulogu imaju algoritmi i pristupi (od kojih su najkorišteni Zevenbergen i Thorne, 1987 i Evans, 1979). Iako su neki autori u svojim radovima dokazali da su određeni algoritmi i pristupi bolji za izračun određenih morfometrijskih parametara (npr. nagiba (Hodgson, 1995; Florinsky, 1998; Jones, 1998; Zhou i Liu, 2004) ili zakrivljenosti padina (Zevenbergen i Thorne, 1987 ; Florinsky, 1998; Schmidt i dr., 2003)), Jenness (2012) je dokazao da navedeni pristupi daju oprečne rezultate, te da niti jedna metoda nije pouzdana, jer se radi o procjeni. Npr. zakrivljenost se temelji na 9 visinskih točaka unutar mreže 3*3, koje mogu loše reprezentirati stvarni reljef na određenom području. U budućim istraživanjima, moguće je primijeniti određene kriterije na temelju kojih se može utvrditi koji je algoritam i pristup prikladniji u analizi zakrivljenosti padina: 1) odabrati mikrolokaciju, tj. homogenu, blago zakrivljenu padinu koja će se snimiti pomoću terestričkog lasera, 2) pomoću baznog GPS-a prikupiti niz točaka koji će činiti profil i u konačnici odrediti liniju kojoj se može odrediti zakrivljenost, 3) na mikrolokaciji odrediti više uzoraka (profila), 4) na terenu utvrditi zakrivljenost i infleksijske linije, 5) podatke prikupljene i analizirane na terenu usporediti s izlaznim rezultatima dobivenih korištenjem određenog algoritma i pristupa.

SAŽETAK

Jedan od najvažnijih zadataka geomorfometrije je izrada i analiza digitalnog modela reljefa, pri čemu je neophodno primijeniti odgovarajuće metode interpolacije. U radu su najprikladnije metode interpolacije odabrane na temelju 8 statističkih parametara: minimalna vrijednost, maksimalna vrijednost, doseg, zbroj vrijednosti, srednja vrijednost, varijanca i standardna devijacija. Od statističkih parametara treba izdvojiti parametar standardne devijacije ili srednje kvadratne pogreške. Ona je u svijetu najkorištenija mjera za ocjenjivanje točnosti digitalnih modela. Osim analize parametara, interpolacijske metode su uspoređene na temelju vjerodostojnih dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih grafičkih prikaza skupa podataka. Korištene su i metode usporedbe volumena jezera primjenom različitih algoritama, metode izračuna i usporedbi profila kao i metode krajobrazne metrike (mjere strukture) za odabrani geomorfometrijski parametar (nagib). Za usporedbu točnosti metoda interpolacije korištena je metoda unakrsnog vrednovanja (*cross-validation*).

Za izradu digitalnih modela reljefa i njihovu međusobnu usporedbu analizirano je 9 determinističkih (triangulacijska nepravilna mreža (*triangulated irregular network* – TIN), prirodni susjed (*natural neighbor* – NaN), ANUDEM ili *topo to raster*, inverzna udaljenost (*inverse distance weighting* – IDW), lokalna polinomna funkcija (*local polynomial* – LP), radijalna osnovna funkcija – tankoslojni splajn (*radial basis function* (ROF) – *thin-plate spline* – TPS), ROF – splajn s tenzijom (*spline with tension* – SWT), ROF – potpuno regulirani splajn (*completely regularized spline* – CRS), ROF – multikvadratna (*multiquadric* – MQ) i ROF – inverzna multikvadratna (*inverse multiquadric* – IMQ)) i 8 geostatističkih metoda interpolacije (obični kriging (*ordinary kriging* – OK), jednostavni kriging (*simple kriging* – SK), univerzalni kriging (*universal kriging* – UK), disjunktivni kriging (*disjunctive kriging* – DK), obični kokriging (*ordinary cokriging* – OCK), jednostavni kokriging (*simple cokriging* – SCK), univerzalni kokriging (*universal cokriging* – UCK), disjunktivni kokriging (*disjunctive cokriging* – DCK)).

Kao ulazni podatci za izradu modela i usporedbu metoda interpolacije korištena su tri skupa visinskih podataka koji su dobiveni različitim metodama, tehnikama i procedurama prikupljanja podataka: 1) batimetrijskom izmjerom, 2) aerofotogrametrijskom izmjerom i stereorestitucijskom obradom i 3) vektorizacijom izohipsi s HOK-a. Osnovno pravilo kod prikupljanja podataka je da se izmjerom prikupe reprezentativne točke reljefa na temelju kojih će se izraditi model koji će aproksimirati stvarnu površinu.

S obzirom na važnost prostorne rezolucije (veličine piksela), kod kreiranja modela objašnjeno je i testirano više metoda za izračun veličine piksela: kartografsko pravilo (*cartographic rule*), kontrola gustoće (*inspection density*), analiza gustoće točaka (*point pattern analysis*) i kompleksnost terena (*complexity of terrain*).

Metode interpolacije i izrađeni modeli uspoređeni su kroz digitalnu analizu reljefa odnosno odabrane morfometrijske parametre da bi se utvrdila primjenjivost modela u geomorfološkim istraživanjima.

Ciljevi rada su sljedeći: Ispitati visinske pogreške DMR-a; Izraditi i usporediti digitalne modele reljefa; Odrediti najprikladnije metode interpolacije za izradu rasterskih modela; Odrediti najprikladnije prostorne rezolucije za izrađene modele; Odrediti batimetrijske značajke, površinu i volumen Vranskog jezera; Analizom odabranih geomorfometrijskih parametra ispitati kvalitetu DMR-a za potrebe geomorfoloških istraživanja.

Temeljne hipoteze ove disertacije su sljedeće: Niskom frekvencijom dubinomjera utvrdit će se debljina i zapremnina sedimenata; Geostatističke metode prikladnije su za interpolaciju u svrhu izrade DMR-a od determinističkih metoda; Točnost stohastičkih metoda ovisi o odabiru kriterija prilikom izrade semivariograma; Smanjenje odstupanja (nugget) negativno utječe na aproksimaciju i procjenu u područjima u kojima nisu vršena mjerenja; Veća vertikalna raščlanjenost reljefa negativno utječe na točnost interpolacijskih algoritama; Vizualna analiza grafičkih prikaza (dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih) utječe na odabir metode interpolacije; Primjenom metoda (mjera) krajobrazne analize moguće je usporediti pet najboljih metoda interpolacije.

U poglavlju o teorijskoj osnovi, prezentiran je detaljni pregled dosadašnje terminologije vezane uz prikaz površine reljefa, uz naglasak da kod korištenja termina treba biti iznimno oprezan jer odabrani termin ovisi o prije svega o metodama prikupljanja visinskih podataka i odabiru istih kod kreiranja digitalnog modela reljefa. U radu se za cijelo područje PP Vransko jezero preferira naziv digitalni model reljefa, koji je nastao interpolacijom visinskih podataka prikupljenih batimetrijskom i aerofotogrametrijskom izmjerom. Digitalni model reljefa definiran je kao pojednostavljeni prikaz dijela reljefa u rasterskom obliku, specifične rezolucije, dobiven odabranom i znanstveno utemeljenom metodom interpolacije podataka o visinama (dubinama) prikupljenih specifičnom batimetrijskom i fotogrametrijskom izmjerom i obradom. Osim navedenog, dat je i detaljan prikaz metoda i tehnika prikupljanja podataka potrebnih za izradu DMR-a te osnovnih struktura organizacije visinskih podataka.

U poglavlju o metodama istraživanja, detaljno su prikazane različite metode, tehnike i procedure čija integracija je bila potrebna za dobivanje kvalitetnih izlaznih rezultata. Metode

primijenjene u istraživanju su determinističke i geostatističke metode interpolacije, metode usporedbe metoda interpolacije, metode odabira prostorne rezolucije, metode batimetrijske izmjere, metode vektorizacije, metode digitalne analize reljefa i metode analize krajobrazne strukture. Svaka od navedenih metoda detaljno je objašnjena, a posebna pažnja posvećena je usporedbi i procjeni kvalitete interpolacijskih metoda, što je i jedan od glavnih ciljeva rada. Glavni problem i izazov bilo je generiranje najtočnije moguće površine na osnovi uzoraka, te utvrđivanje karaktera pogrešaka i varijabilnosti procijenjenih vrijednosti testiranjem i usporedbom različitih metoda interpolacije. Uspoređeno je 17 metoda interpolacije: 9 determinističkih i 8 geostatističkih. Najprikladnija metoda interpolacije odabrana je na temelju uspostavljenih osam parametara: minimalna vrijednost, maksimalna vrijednost, doseg, zbroj vrijednosti, srednja vrijednost, varijanca i standardna devijacija. U Poglavlju o batimetrijskom istraživanju, opisane su primijenjene metode i tehnike batimetrijske izmjere, principi rada dubinomjera, plan i svrha batimetrijske izmjere. Također, dan je opis sekundarnih podataka neophodnih za optimalno planiranje batimetrijske izmjere kao i opis njihove obrade i interpretacije. Naglašena je važnost procjene vrijednosti na neuzorkovanim područjima korištenjem različitih interpolacijskih metoda. Uspoređena je učinkovitost 16 metoda interpolacije, određeni su najprikladniji interpolatori za izradu rasterskog modela jezera te izračun površine i volumena jezera, što predstavlja nov i originalni doprinos ovog rada.

U poglavlju o izradi DMR-a iz podataka dobivenih vektorizacijom izohipsi, razmotrena je točnost HOK-a (Hrvatske osnovne karte, u mjerilu 1: 5000) te je opisan postupak izrade DMR-a PP Vransko jezero vektorizacijom izohipsi s hrvatskih osnovnih karata. Da bi se okvirno utvrdile razlike između modela izrađenih iz visinskih podataka prikupljenih aerofotogrametrijom i vektorizacijom izohipsi s HOK-a, uspoređene su 2 metode interpolacije, Topo to Raster i Obični kokriging. Analiziran je geomorfometrijski parametar nagib na području jaruga Mernjača i Mednjača. Utvrđeno je da su i jedan i drugi model prikladni za geomorfološke analize, međutim, ukoliko se rade specifične analize npr. strmaca ili mikrodenudacijskih oblika, bolje rezultate pokazuju podatci interpolirani metodom obični kokriging. Istaknuta je važnost ovog postupka za opće analize u geomorfologiji.

U poglavlju o izradi DMR-a iz podataka prikupljenih fotogrametrijom predstavljene su faze neophodne za izradu DMR-a, a to su: konvertiranje podataka iz jednog formata u drugi, konvertiranje linija, točnije lomnih točaka, u pojedinačne točke, topološka korekcija podataka, testiranje metoda interpolacije i odabir prostorne rezolucije. U okviru ovog poglavlja razrađen

je problem interpolacije aerofotogrametrijski prikupljenih podataka, dokazana je mjera stabilnosti i točnosti primijenjenih interpolacijskih algoritama i provedena je usporedba metoda interpolacije kroz dvodimenzionalne i trodimenzionalne prostorne prikaze. Uz to, istaknuta je potreba uzimanja u obzir specifičnih karakteristika reljefa za koji se rade analize, zbog čega se javlja potreba prilagodbe u smislu diferencijalne primjene određenih metoda.

U poglavlju o digitalnim analizama reljefa, definiran je pojam i svrha digitalne analize reljefa i istaknuti su faktori koji imaju važan utjecaj na izlazne rezultate analize. Teorijske pretpostavke primjenjene su na geomorfološke, odnosno morfometrijske parametre (vertikalna raščlanjenost, nagib, ekspozicije i zakrivljenost padina). Komparativnom analizom više modela različitih prostornih rezolucija došlo se do zaključka da prostorna rezolucija znatno utječe na izlazne rezultate analize morfometrijskih parametara. Uz to, primjenom mjera krajobrazne strukture, na primjeru morfometrijskog parametra nagiba, uspoređeno je pet najboljih metoda interpolacije. Mjere strukture se odnose na specifičnu konfiguraciju elemenata odabranog morfometrijskog parametra, koja prikazuje veličinu i oblik elemenata, njihovu prostornu raspodjelu i međusobni odnos. Na primjerima je dokazano da se mjere strukture mogu koristiti za egzaktno utvrđivanje razlika između metoda izračuna vrijednosti morfometrijskih pokazatelja, što je od bitnog značaja za primijenjena geomorfološka istraživanja.

U raspravi i zaključku, istaknuto je da je istraživanje pokazalo da izlazni rezultati digitalnog modeliranja i analize reljefa ovise o metodama prikupljanja podataka, gustoći uzoraka, metodama interpolacije, osobinama reljefa, veličini piksela i primijenjenim algoritmima. Usporedbom 17 metoda interpolacije (9 determinističkih i 8 geostatističkih) zaključeno je da nema univerzalne metode interpolacije koja pokazuje najbolje rezultate za različite vrste podataka, jer izlazni rezultati ovise o metodama prikupljanja podataka. Također, istaknuto je da ne postoji najbolja metoda interpolacije jer su sve metode uvjetovane prostorno-vremenskom komponentom.

Činjenica da geostatističke metode interpolacije sadrže matematičke funkcije i teoriju vjerojatnoće razlog je postavljanju hipoteze da su geostatističke metode bolji interpolatori od determinističkih metoda interpolacije, što je u radu i potvrđeno.

Pri izradi modela iz batimetrijski prikupljenih podataka uspoređeno je 16 metoda interpolacije, a kao najbolja, prema svim statističkim parametrima, pokazao se obični kokriging. Na temelju optimalne metode interpolacije izračunata je površina, opseg i volumen Vranskog jezera (površina 29,865 km², opseg 35,851 km a volumen 50076679 m³).

Za izradu modela iz vektoriziranih izohipsi uspoređene su dvije metode interpolacije: TIN i *Topo to raster*. Metode su pokazale značajne razlike u generiranju površina, posebice na zaravnjenijim područjima. Bolje rezultate pokazala je *Topo to raster* metoda, koja je prikladna za izradu modela koji se koriste za geomorfološka istraživanja.

Za izradu modela iz aerofotogrametrijskih podataka uspoređeno je 17 metoda interpolacije. Analizom statističkih parametara, od geostatističkih metoda najbolje rezultate pokazala je metoda jednostavni kriging, a kod determinističkih multikvadratnik. Usporedbom ovih dvaju metoda, bolje rezultate pokazala je metoda jednostavni kriging, jer je i s 50% manje visinskih točaka dala zadovoljavajuće rezultate. Daljnjim analizama statističkih parametara i grafičkim usporedbama (dvodimenzionalnim i trodimenzionalnim) optimalne rezultate za potrebe geomorfoloških istraživanja pokazale su sljedeće metode: prirodni susjed, ROF – multikvadratna i jednostavni kokriging.

Što se prostorne rezolucije tiče, na temelju provedenih analiza, zaključeno je da na odabir optimalne rezolucije utječu sljedeći parametri: gustoća prikupljenih podataka, metoda prikupljanja podataka, složenost terena i metoda interpolacije. Testiranjem 5 kriterijskih metoda odabira prostorne rezolucije, utvrđeno je da ne postoji univerzalna metoda interpolacije, bez obzira na metodu prikupljanja podataka, broj izmjerenih točaka i vertikalnu raščlanjenost.

Pri usporedbi metoda interpolacije, u analizi geomorfometrijskog parametra nagiba primijenjene su mjere krajobrazne strukture, koje predstavljaju potpuno nov pristup pomoću kojeg je moguće na egzaktn način dokazati sličnosti i razlike između 5 najboljih metoda interpolacije.

Istaknuto je da sve provedene analize i zaključci izvedeni iz njih mogu biti korisni za buduća istraživanja metoda prikupljanja podatka, interpolacije, odabira prostorne rezolucije i digitalne analize reljefa. Naglašeno je da bi, tijekom budućih istraživanja, bilo korisno analizirati i usporediti metode interpolacije koje su integrirane u druga softverska rješenja. Također, problematizirano je pitanje uloge sadašnjih metoda usporedbe metoda interpolacije.

Na kraju, posebno je naglašeno da na izlazne rezultate digitalnih analiza reljefa, osim DMR-a, najznačajniju ulogu imaju algoritmi i metodološki pristup. Preporuka je da bi u budućim istraživanjima bilo uputno primijeniti unaprijed određene precizne kriterije na temelju kojih bi se moglo utvrditi koji je algoritam i pristup najprikladniji u analizama geomorfometrijskih značajki reljefa.

SUMMARY

One of the most important tasks of geomorphometry is the development and analysis of the digital terrain model, which renders various methods of interpolation as an essential part of the task. This paper analyses the most appropriate methods chosen on the basis of eight statistical parameters: minimum value, maximum value, range, value sum, mean value, variation and standard deviation. Among various statistical parameters, that of standard deviation or mean squared error is the most notable. It is the most used method of evaluating the precision of digital terrain models world-wide. Apart from the analyses of parameters, interpolation methods were compared on the basis of reliable two-dimensional and three-dimensional graphical preview of data sets. Methods of lake volume comparison were also used by means of various algorithms, methods of calculation and comparison of profiles, as well as methods of landscape metrics (structure metrics) for the selected geomorphometric parameter (slope inclination). For the comparison of precision of these interpolation methods, another method was used, that of cross validation.

For the development of digital terrain models and their comparison, nine deterministic geostatistic methods of interpolation were used: triangulated irregular network – TIN, natural neighbor – NaN, ANUDEM or topo to raster, inverse distance weighting – IDW, local polynomial function – LP, radial basis function (ROF) thin-plate spline – TPS, ROF spline with tension – SWT, ROF completely regularized spline – CRS, ROF multiquadric function – MQ and ROF inverse multiquadric function – IMQ. The research also included eight geostatistical interpolation methods: ordinary kriging – OK, simple kriging – SK, universal kriging – UK, disjunctive kriging – DK, ordinary cokriging – OCK, simple cokriging – SCK, universal cokriging – UCK and disjunctive cokriging – DCK.

For the input data, three sets of height data were used, which were attained by various methods, techniques and procedures: 1) bathymetric measuring, 2) aero photogrammetry and stereo restitution, and 3) vectorization of contour lines from HOK. The main rule in regards to collecting data is to gather representative height points of the terrain which will serve as the basis of development of the model in order to approximate the real terrain surface.

Considering the importance of spatial resolution (the size of the pixel), during the creation of the model several different methods were explained and tested: cartographic rule, inspection density, point pattern analysis and complexity of terrain.

The methods of interpolation and the created models were compared through a digital terrain analysis, meaning specific morphometric parameters, in order to determine the applicability of the model in geomorphological researches.

The aims of this research are as follows: To test the elevation-related errors in DTM (digital terrain model); To create and compare digital terrain models; To determine the most appropriate methods of interpolation for the created models; To determine the most appropriate spatial resolution for the created models; To determine bathymetric features, surface area and the volume of Lake Vrana; To test the quality of DTM in geomorphological research by means of analysis of specific geomorphometric parameters.

The main hypotheses of this dissertation are these: By using a low frequency sonar it is possible to determine the thickness and the volume of sediments; For the purpose of creating DTM, geostatistical methods are more appropriate for interpolation than deterministic ones; The accuracy of stochastic methods depends on the chosen criteria during the creation of semivariograms; Decreasing the deviation (nugget) negatively affects the approximation and estimation in those areas in which measurements were not employed; Higher terrain energy negatively affects the accuracy of interpolation algorithms; The visual analysis of graphic representations (both two-dimensional and three-dimensional) affects the selection of a specific interpolation method; By using the method of landscape analysis it is possible to compare five most appropriate methods of interpolation.

In the chapter on theoretical basis, the paper presents a detailed overview of the current terminology concerning the terrain display, with special attention given to the fact that one needs to be very careful when using specific terms, since they depend on methods of obtaining the elevation data and the way it is used when creating the digital terrain model. This paper also uses the term 'digital terrain model' to refer to the entire area of the natural park of Lake Vrana, a model that was created by interpolating elevation data gathered by bathymetry and aero photogrammetry. A digital terrain model is defined as a simplified representation of terrain in a rasterized manner, which has a specific resolution, and which was created by a chosen scientific method of interpolation of elevation data, gathered by bathymetry and aero photogrammetry. In addition to those, the paper also focuses on a detailed overview of various methods used to gather data necessary for the development of DTM, as well as some basic structural organizations of elevation data.

The chapter on research methods also deals in detail with various methods, techniques and procedures, which were necessarily integrated to obtain a quality output set of data. Methods used in the research are deterministic and geostatic interpolations, methods of

comparison of methods of interpolation, methods of selection of spatial resolution, methods of bathymetry, methods of vectorization, methods of digital analysis of terrain and methods of landscape structure analysis. Each of these methods was explained in detail, with special attention given to the comparison and evaluation of quality of interpolation methods, which is one of the main aims of this research. The main problem and challenge was the process of generating the most precise terrain surface based on the available samples, as well as determining the features of errors and variability of the estimated values by means of testing and comparing various interpolation methods. In total, 17 methods of interpolation were compared: 9 deterministic and 8 geostatistical. The most suitable method of interpolation was chosen on the basis of eight parameters: minimum value, maximum value, range, value sum, mean value, variance and standard deviation. With these parameters in mind, the success of each interpolation methods was evaluated.

The chapter on bathymetry features descriptions of methods and techniques of bathymetric measuring, principles of sonar as well as the plan and purpose of bathymetric measurement. In addition, a description of secondary data was given, which were necessary for an optimal bathymetric measurement, as well as descriptions of the analysis and interpretation of such data. Attention was given to the importance of estimation of values via interpolation in those areas which were not sampled. This section also features the comparison of 16 methods of interpolation. Several most appropriate interpolators were chosen: for the creation of raster model of the lake, and for the calculation of the surface area and volume of the lake, which stands as a new and original contribution of this research.

In the chapter on the development of DTM via vectorization of contour lines, attention was given to the precision of HOK (Basic Croatian Map, scale 1:5000) and to the process of creation of DTM of the Lake Vrana natural park via vectorization of contour lines from HOK maps. In order to conclude the differences between aero photogrammetry-based DTM and HOK-based DTM, two methods of interpolation were compared, *Topo to Raster* and ordinary cokriging. The analysis also included the geomorphometric parameter of slope inclination in the area of Mernjača and Mednjača ravines. Both models were concluded to be appropriate for geomorphologic analyses, however, in case of specific analyses such as cliffs or micro-denudational shapes, the ordinary cokriging method yields better results. Attention was given to the importance of this procedure in geomorphological analyses.

The chapter on the creation of DTM from the data gathered by photogrammetry also introduces phases necessary for the development of DTM, which are: converting data from one format to another, converting lines or breaklines into individual points, topologic

correction of data, testing of interpolation methods and the selection of spatial resolution. This chapter also deals with the problem of interpolation of data gathered via aero photogrammetry. It also determines the level of stability and precision of the used interpolation methods, and it features a comparison of methods of interpolation through two-dimensional and three-dimensional spatial models. In addition, this chapter emphasizes the need to consider specific characteristics of the terrain used for analysis, which calls for an additional level of adaptation in terms of differential usage of specific methods.

The chapter on digital terrain analysis features the definition of the term and the goals of digital analysis, as well as emphasizing various factors which play a significant effect on the output data. Theoretical bases were applied to geomorphological or morphometric parameters (terrain energy, slope inclination, exposition and slope curvature). By comparatively analyzing multiple models of spatial resolution, a conclusion was reached, in which is stated that the spatial resolution significantly affects the output results of the analysis of morphometric parameters. In addition, by applying landscape metrics on the example of morphometric parameter of slope inclination, five most appropriate methods of interpolation were compared. Structural measures refer to the specific configuration of elements of the chosen morphometric parameter, which describes the size and the shape of the elements, their spatial distribution and their relation. Multiple examples demonstrated that those measures can be used for exact determination of differences between various methods of evaluation of morphometric parameters, which is of prime importance for applied geomorphologic researches.

In the discussion and conclusion chapters the paper emphasizes on the fact that the output results of digital modeling and terrain analysis largely depend on the methods of data gathering, density of samples, methods of interpolation, features of the terrain, size of pixels and applied algorithms. By means of comparison of 17 methods of interpolation (9 deterministic and 8 geostatistical), the research concluded that there is no universal method of interpolation that would show the best output result in any sort of data sets, because the output results depend on the data gathering methods. In addition, it is emphasized that there is no universal best method of interpolation since all methods are conditioned by spatial and temporal component.

The fact that geostatistical methods of interpolation contain mathematical functions and the theory of probability is the reason for acknowledging the hypothesis that geostatistical methods are generally better interpolators than deterministic ones, which this research has in fact proved.

During the development of models from various bathymetric data, 16 methods of interpolation were compared. Amongst them, according to all statistical parameters, the best one turned out to be ordinary cokriging. On the basis of optimal method of interpolation, Lake Vrana's surface area, circumference and volume were calculated (surface 29,865 km², circumference 35,851 km, and volume 50,076,679 m³).

For the development of models from vectorized contour lines, two methods of interpolation were compared: TIN and Topo to raster. Methods showed significant differences in the generation of surface, especially on flat areas. Topo to raster method showed better results, which turned out to be more appropriate for the development of models that could be used for geomorphological research.

For the development of models based on aero photogrammetric data, 17 methods of interpolation were compared. By analyzing statistical parameters, it was concluded that the best results amongst geostatistical methods were obtained by the ordinary cokriging method, whereas amongst the deterministic ones, the best results were obtained by multiquadratic function. After comparing these two methods, the ordinary cokriging method showed better results, since it resulted in satisfactory output data even with 50% less input elevation points. After further analyses of statistical parameters and by comparing graphical outputs (two and three-dimensional), further methods showed optimal results for the purpose of geomorphological research: natural neighbor, ROF multiquadratic function and ordinary cokriging.

The optimal spatial resolution, according to the analyses done in this research, is affected by the following parameters: density of the gathered data, methods of data gathering, complexity of terrain and method of interpolation. By testing five different methods of generating spatial resolution, the conclusion was that there is no universal method of interpolation, regardless of data gathering method, number of elevation points or terrain energy.

Landscape metrics were used in the process of comparing various methods of interpolation, during the analysis of geomorphometric parameter of slope inclination. There represent a completely new approach, by which it is possible to prove similarities and differences between five best methods of interpolation in an exact manner.

It is emphasized that all the employed analyses, and conclusions derived from them, can be used for future researches on the methods of data gathering, interpolation, spatial resolution selection and digital terrain analysis. It would be useful for further future researches to analyze and compare various methods of interpolation which are integrated in

other software tools. In addition, a special attention is given to the role of current methods of comparison of interpolation methods (such as models which are result of elevation data gathered by aero photogrammetry and stereo restitution, by means of deterministic and geostatistical interpolation) in regards to potential new technologies (such as terrestrial lasers of high precision).

Finally, a special emphasis is given to the fact that the output results of digital terrain analysis are mostly affected by algorithms and methodological approach, in addition to DTM. It is recommended, for the future researches, to use previously established high-precision criteria in order to establish which algorithm and approach are the most appropriate in the analysis of geomorphometric features of terrain.

LITERATURA I IZVORI

1. Adami, A., Guerra, F., Vernier, P., 2007: Laser Scanner and Architectural Accuracy Test, CIPA Symposium 21, 1-6 October 2007, Athena, Greece, <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-C53/papers/FP003.pdf> (21. 10. 2012.)
2. Aguilar, F. J., Agüera, F., Aguilar, M. A., Carvajal, F., 2005: Effects of terrain morphology, sampling density, and interpolation methods on grid DEM accuracy, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 71 (7), 805 -816.
3. Ahmed, S., 2010: Water Volume Calculation of Hill Country Trinity Aquifer Blanco, Hays, and Travis Counties, Central Texas GIS and GPS Applications in Earth Science, http://www.geo.utexas.edu/courses/371C/project/2010F/Ahmed_Project.pdf (6.05.2012.)
4. AHS, 2012: LADS II (Laser Airborne Depth Sounder), <http://www.hydro.gov.au/aboutus/lads.htm> (28.05.2012.)
5. Albani, M., Klinkenberg, B., Andison, D. W., Kimmins, J. P., 2004: The choice of window size in approximating topographic surfaces from digital elevation models, *International Journal of Geographical Information Science* 18 (6), 577-593.
6. Ali, T. A., 2004: On the selection of an interpolation method for creating a terrain model (TM) from LIDAR data, u: *American Congress on Surveying and Mapping (ACSM) Conference 2004: Proceedings*, Nashville TN, U.S.A.
7. Andričević, R., Gotovac, H., Ljubekov, I., 2006: *Geostatistika: umijeće prostorne analize*, Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split.
8. Anselin, L., 1998: Exploratory spatial data analysis in a geocomputational Environment, u: *GeoComputation* (ur. Longley, P., Brooks, S., Macmillan, B., McDonnell, R.), a Primer, John Wiley, New York, 77-94.
9. Anselin, L., 1999: Interactive techniques and exploratory spatial data analysis, u: *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications* (ur. Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., Rhind, D. W.), John Wiley, New York, 251-264.
10. Antonić, O., 1996: Modeli utjecaja topoklime na vegetaciju krša, *Disertacija*, PMF - Biološki odsjek, Zagreb.
11. Ascione, A., Cinque, A., Miccadei, E., Villani, F., Berti, C., 2008: The Plio-Quaternary uplift of the Apennine chain: new data from the analysis of topography and river valleys in Central Italy, *Geomorphology* 102 (1), 105-118.

12. Bamber, J. L., Gomez-Dans, J. L., Griggs, J. A., 2009: A new 1 km digital elevation model of the Antarctic derived from combined satellite radar and laser data—Part 1: Data and methods, *The Cryosphere* 3, 101-111.
13. Band, L. E., 1986: Topographic partition of watersheds with digital elevation models, *Water Resources Research* 22 (1), 15-24.
14. Barnes, R., 2003: *Variogram tutorial*, Golden Software, Inc., ftp://140.114.75.87/liu-yuan/gman_slide/YARLO/PAPER/variogramTutorial.pdf (09.09.2012.)
15. Basa, L., Juraj, I., 2011: Oblak točaka i AutoCAD Civil 3D 2011, *Ekscentar* 14, 34-39.
16. Berens, P., 2006: Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR), u: *Advanced Radar Signal and Data Processing*, Educational Notes RTO-EN-SET-086, Paper 3. Neuilly-sur-Seine, France: RTO, <http://ftp.rta.nato.int/public//PubFullText/RTO/EN/RTO-EN-SET-086//EN-SET-086-03.pdf> (20.10.2012.)
17. Beutel, A., Molhave, T., Agarwal, P. K., 2010: Natural neighbor interpolation based grid DEM construction using a GPU, u: *18th ACM SIGSPATIAL International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, November 2-5, 2010, San Jose, CA, USA, 172-181, <http://152.3.140.5/~thomasm/papers/beutelACMGIS10-nni.pdf> (01.07.2012.)
18. Beutel, A., Molhave, T., Agarwal, P. K., Boedihardjo, A. P., Shine, J. A., 2011: TerraNNI: natural neighbor interpolation on a 3D grid using a GPU, u: *19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (ACM SIGSPATIAL GIS 2011)* (ur. Cruz, I., Agrawal, D.), November 1-4 2011, Chicago, Illinois, 64-74.
19. Bezzi, M., Vitti, A., 2005: A comparison of some kriging interpolation methods for the production of solar radiation maps, *Geomatics Workbooks* 5, 1-17.
20. Biesemans, J., Meirvenne, M. V., Gabriels, D., 2000: Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict longterm average offsite sediment accumulation, *Journal of Soil and Water Conservation* 55 (1), 35-42.
21. Biljecki, Z., Tonković, T., Franić S., 1995: *Studija o nadomještanju reprodukcijskih izvornika i obnavljanju sadržaja topografskih zemljovida*, Znanstveno-stručni projekt, Geofoto d.o.o., Zagreb.
22. Binh, T. Q., Thuy, N. T., 2008: Assessment of the influence of interpolation techniques on the accuracy of digital elevation model, VNU Journal of Science, *Earth Sciences* 24, 176-183.
23. Bishop, C. M., 1995: *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford Press, Oxford.

24. Bishop, M. P., Shroder, J. F., 2000: Remote sensing and geomorphometric assessment of topographic complexity and erosion dynamics in the Nanga Parbat massif, u: *Tectonics of the Nanga Parbat Syntaxis and the Western Himalaya* (ur. Khan, M. A. i dr.), Geological Society London, London, 181-199.
25. Bohling, G., 2005: Introduction to geostatisticsa and variogram analysis, <http://www.ecst.csuchico.edu/~juliano/csci693/Presentations/2008w/Materials/Kalkundrikar/DOCS/Variograms.pdf> (28.09.2012)
26. Boissonnat, J-D., Cazals, F., 2001: Smooth surface reconstruction via natural neighbour interpolation of distance functions, *Computational Geometry* 22, 185-203.
27. Brus, D. J., De Gruijter, J. J., Marsman, B. A., Visschers, R., Bregt, A. K., Breeuwsma, A., Bouma, J., 1996: The performance of spatial interpolation methods and choropleth maps to estimate properties at points: a soil survey case study, *Environmetrics* 7, 1-16.
28. Burrough, P. A., 1986: *Principles of Geographic Information System For Land Resource Assessment*, Oxford University Press, New York.
29. Burrough, P. A., McDonnell, R. A., 1998: *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press, New York.
30. Caress, D. W., Thomas, H., Kirkwood, W. J., McEwen, R., Henthorn, R., Clague, D.A., Paull, C. K., Paduan, J., Maier, K. L., 2008: High-Resolution Multibeam, Sidescan, and Subbomt Surveys Using the MBARI AUV D. Allan B., u: *Proceedings of the Marine Habitat Mapping Technology for Alaska Workshop* (ur. Reynolds, J. R., Greene, H.G.), April 2-4 Anchorage AK, University of Alaska Fairbanks, 47-69.
31. Carr, J. C., Fright, W. R., 1997: Surface Interpolation with Radial Basis Functions for Medical Imaging, *IEEE Transactions on Medical Imaging* 16 (1), 96-107.
32. Carrasco, P. C., 2010: Nugget effect, artificial or natural, *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 110, 299-305.
33. Cetl, V., Tutić, D., 2002: Automatska vektorizacija u katastru, *Geodetski list* 56 (2), 103-116.
34. Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguédois, S., Silvera, N., Phachomphon, K., 2006: Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density, *Geomorphology* 77 (1-2), 126-141.
35. Chaubey, I., Cotter, A. S., Costello, T. A., Soerens, T. S. 2005: Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty, *Hydrological Processes* 19, 621-628.
36. Chen, C. T., Millero, F.J., 1977: Speed of sound in seawater at high pressures, *Journal Acoustic Society of America* 62 (5), 1129-1135.

37. Cheveresan, B., 2012: Digital Terrain Model Accuracy for Flooded Area Delineation, <http://balwois.com/2012/USB/papers/523.pdf> (29.10.2012).
38. Childs, C., 2004: Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst, ESRI Education Services, <http://webapps.fundp.ac.be/geotp/SIG/interpolating.pdf> (12.5.2012.)
39. Chou, Y. H., Liu, P. S., Dezzani, R. J., 1999: Terrain complexity and reduction of topographic data, *Geographical Systems* 1 (2), 179-197.
40. Clark, I., Harper, W. V., 2001: *Practical Geostatistics 2000*, Ecosse North America LLC, Columbus, Ohio, USA.
41. Clarke, J. E. H., 2003: Dynamic Motion Residuals in Swath Sonar Data: Ironing out the Creases, http://www.omg.unb.ca/omg/papers/Lect_26_paper_ihr03.pdf (06.05.2012.)
42. Collins, F. C., Bolstad, P. V., 1996: A comparison of spatial interpolation techniques in temperature estimation, u: *Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling: Proceedings*, Santa Fe, New Mexico, Santa Barbara, 21-25 January CA: National Center for Geographic Information and Analysis, Santa Barbara.
43. Cressie, N., 1993: *Statistics for Spatial Data*, revised ed., John Wiley and Sons, New York.
44. Desmet, P. J. J., 1997: Effects of interpolation errors on the analysis of DEMs, *Earth Surface Processes and Landforms* 22, 563-580.
45. Desmet, P. J. J., Govers, G., 1996a: Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies, *International Journal of Geographical Information Systems* 10 (3), 311-331.
46. Desmet, P. J. J., Govers, G., 1996b: A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units, *Journal of Soil and Water Conservation* 51 (5), 427-433.
47. DGU, 2003: Specifikacija proizvoda: Digitalni model reljefa, CRONO GIP, Zagreb.
48. Dietrich, W. E., Wilson, C. J., Montgomery, D. R., McKean, J., 1993: Analysis of erosion thresholds, channel networks, and landscape morphology using a digital terrain model, *Journal of Geology* 101 (2), 259-278.
49. Dikau, R., 1989: The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology, u: *Three Dimensional Applications in Geographic Information Systems*, (ur. Raper, J.), Taylor and Francis, Chichester, 51-77.
50. Dikau, R., Brabb, E. E., Mark, R. K., Pike, R. J., 1995: Morphometric landform analysis of New Mexico, *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F. Suppl.-Bd.* 101, 109-126.

51. Dikau, R., Rasemann, S., Schmidt, J., 2004: Hillslope Form, u: *Encyclopedia of Geomorphology* (ur. Goudie, A. S.), Routledge, London, 516-521.
52. Diolaiuti, G., Kirkbride, M. P., Smiraglia, C., Benn, D. I., D'Agata, C., Nicholson, L., 2005: Calving processes and lake evolution at Miage Glacier (Mont Blanc, Italian Alps), *Annals of Glaciology* 40, 207-214.
53. Dobesch, H., Dumolard, P., Dyras, I., 2007: *Spatial interpolation for climate data: The use of GIS in climatology and meteorology*, ISTE Ltd., London.
54. Dorren, L. K. A., Heuvelink, G. B. M., 2004: Effect of support size on the accuracy of a distributed rockfall model, *International Journal of Geographical Information Science* 18 (6), 595-609.
55. Duan, J., Grant, G. E. 2000: Shallow landslide delineation for steep forest watersheds based on topographic attributes and probability analysis, u: *Terrain Analysis: Principles and Application* (ur. Wilson, J. P., Gallant, J. C.), John Wiley & Sons Press: New York, New York, 311-330.
56. Đapo, A., Medved, I., 2003: Trodimenzionalni geodetski model jezera šljunčare Novo Čiče, *Ekscentar* 5, 13-18.
57. Eldeiry, A., Garcia, L., 2011: Using Deterministic and Geostatistical Techniques to Estimate Soil Salinity at The Sub-Basin and Field Scale, u: 31th Annual Hydrology Days (ur. Shuttleworth, W. J.), March 21-23, Fort Collins, 1-21.
58. Erdogan, S., 2009: A comparison of interpolation methods for producing digital elevation models at the field scale, *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 366-376.
59. Ernsten, V., Noormets, R., Hebbeln, D., Bartholomé, A., Flemming, B., 2006: Precision of high-resolution multibeam echo sounding coupled with high-accuracy positioning in a shallow water coastal environment, *Geo-Marine Letters* 26 (3), 141-149.
60. Evans, I. S., 1979: *An integrated system of terrain analysis and slope mapping*, Final report on grant DAERO-591-73-G0040, University of Durham, England.
61. Evans, I. S., 1980: An integrated system of terrain analysis and slope mapping, *Zeitschrift für geomorphologie* 36, 274-295.
62. Fan, Q., Efrat, A., Koltun, V., Krishnan, S., Venkatasubramanian, S., 2005: Hardware-assisted natural neighbor interpolation, u: *7th Workshop on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX)*, SIAM, 111-120, http://scholar.google.hr/scholar?q=Hardware-assisted+natural+neighbor+interpolation&btnG=&hl=hr&as_sdt=0%2C5 (02.07.2012.)
63. Fasshauer, G. E., 1999: Solving partial differential equations with radial basis functions: Multilevel methods and smoothing, *Adv. Comp. Math.* 11 (2-3), 139-159.

64. Finkl, C. W., Benedet, L., Andrews, J. L., 2004: Laser airborne depth sounder (lads): a new bathymetric survey technique in the service of coastal engineering, environmental studies, and coastal zone management, u: *17th annual national conference on beach preservation technology: Proceedings*, 11-13 February 2004, Lake Buena Vista, Florida, Florida Shore & Beach Preservation Association, Tallahassee, Florida.
65. Fisher, P. F., Tate, N. J., 2006: Causes and consequences of error in digital elevation models, *Progress in Physical Geography* 30 (4), 467-489.
66. Fleming, M. D., Hoffer, R. M., 1979: *Machine processing of Landsat MSS data and LARS*, Technical Report 062879, Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
67. Florinsky, I. V., 1998a: Derivation of topographic variables from a digital elevation model given by a spheroidal trapezoidal grid, *International Journal of Geographical Information Science* 12 (8), 829-852.
68. Florinsky, I. V., 1998b: Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models, *International Journal of Geographical Information Science* 12 (1), 47-61.
69. Florinsky, I. V., 2002: Errors of signal processing in digital terrain modeling, *International Journal of Geographical Information Science* 16 (5), 475-501.
70. Foote, K. G., Atkins, P. R., Francis, D. T. I., Knutsen, T., 2005: Measuring echo spectra of marine organisms over a wide bandwidth, u: *Proceedings of the International Conference on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results* (ur. Papadakis, J. S., Bjørnø, L.), 28 June - 1 July 2005 Heraklion, Greece, Institute of Applied and Computational Mathematics (IACM) at the Foundation for Research and Technology (FORTH), Greece, 501-508.
71. Frančula, N., 2004: *Digitalna kartografija*, 3. prošireno izdanje, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
72. Franke, R., 1982: Scattered data interpolation: tests of some methods, *Mathematics of Computation* 38 (158), 181-200.
73. Gajski, D., 2007: Osnove laserskog skeniranja iz zraka, *Ekscentar* 10, 16-22.
74. Galloway, J. L., Collins, W. T., 1998: Dual frequency acoustic classification of seafloor habitat using the QTC VIEW, u: *OCEANS '98 Conference Proceedings* (ur. Collins, W. T.), 28 September - 1 October Nice, OCEANS'98 IEEE/OES, France, 1296-1300.

75. Giles, P. T., 1998: Geomorphological signatures: classification of aggregated slope unit objects from digital elevation and remote sensing data, *Earth Surface Processes and Landforms* 23 (7), 581-594.
76. Gjuranić, Ž., 2008: Modeliranje terena pomoću Delaunayjeve triangulacije, *KoG* 11 (11), 49-52.
77. Glamuzina, M., 1986: *Delta Neretve: promjene agrarnog pejzaža u delti Neretve*, Savez geografskih društva Hrvatske, Zagreb.
78. Golden Software, Inc., 2002: *Surfer 8 Users' Guide*, Golden Software Inc., Golden, Colorado.
79. Golek, D., Dobrinić, D., Kordić, B., 2012: Usporedba terestričkih laserskih skenera, *Ekscentar* 15, 54-61.
80. Goodchild, M. F., Mark, D. M., 1987: The fractal nature of geographic phenomena, *Annals of Association of American Geographers* 77 (2), 265-278.
81. Goovaerts, P., 1997: *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press, New York.
82. Gousie, M. B., Franklin, W.R., 2003: Constructing a DEM from grid-based data by computing intermediate contours, <http://www.ecse.rpiscrews.us/Homepages/wrf/Research/p/p06-gousie.pdf> (20.09.2012.)
83. Govers, G., Takken, I., Helming, K., 2000: Soil roughness and overland flow, *Agronomie* 20 (2), 131-146.
84. Govorčin, M., Kovačić, F., Žižić, I., 2012: Bepilotne letjelice SenseFly Swinglet CAM, *Ekscentar* 15, 62-68.
85. Graham, N., Jones, E. G., Reid, D. G., 2004: Review of technological advances for the study of fish behaviour in relation to demersal fishing trawls, *ICES Journal of Marine Science* 61(7), 1036-1043.
86. Grohmann, C., 2004: Morphometric analysis in geographic information systems: applications of free software GRASS and R?, *Computer and Geoscience* 30 (9-10), 1055-1067.
87. Guenter, G. C., Cunningham, A. G., Larocque, P. E., Reid, D. J., 2000: Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry, u: *Proceedings of the EARSeL-SIG-Workshop LIDAR*, June 16 - 17 Dresden, Germany, <http://www.fugro-pelagos.com/lidar/lib/papers/MeetingAccuracyChallenge.pdf> (15.06.2012)
88. Hardy, R. L., 1971: Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces, *Journal of Geophysical Research* 76 (8), 1905-1915.

89. Hartkamp, A. D., De Beurs, K., Stein, A., White, J. W., 1999: *Interpolation Techniques for Climate Variables*, NRG-GIS Series 99-0, CIMMYT, Mexico, D. F.
90. Heine, G. W., 1986: A Controlled Study of Some Two-Dimensional Interpolation Methods, *COGS Computer Contributions* 3 (2), 60-72.
91. Hengel, T. 2006: Finding the right pixel size, *Computer and Geosciences* 32 (9), 1283-1298.
92. Hengel, T., 2007: *A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables*, European Communities, JRC Scientific and Technical Report, Luxembourg.
93. Hengl, T., Gruber, S., Shrestha, D. P., 2003: *Digital terrain analysis in ILWIS: lecture notes and user guide*, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, Netherlands.
94. Hengl, T., Gruber, S., Shrestha, D. P., 2004: Reduction of errors in digital terrain parameters used in soil-landscape modelling, http://www.geo.unizh.ch/~stgruber/pubs/hengl_2004-JAG.pdf (16.02.2012.)
95. Hengel, T., Minasny, B., Gould, M., 2009: A geostatistical analysis of geostatistics, *Scientometrics* 80 (2), 491-514.
96. Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., Jarvis, A., 2005: Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology* 25 (15), 1965-1978.
97. Hobson, R. D., 1972: Chapter 8 - surface roughness in topography: quantitative approach, u: *Spatial analysis in geomorphology* (ur: Chorley, R. J.), Harper & Row, New York, 221-245.
98. Hodgson, M. E., 1995: What cell size does the computed slope/aspect angle represent?, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 61 (2), 513-517.
99. Hoehstetter, S., Walz, U., Dang, L. H., Thinh, N. X., 2008: Effects of topography and surface roughness in analyses of landscape structure - a proposal to modify the existing set of landscape metrics, *Landscape Online* 1, 1-14.
100. Hofierka, J., Cebecauer, T., Šuri, M., 2007: Optimisation of Interpolation Parameters Using a Cross-validation, u: *Digital Terrain Modelling* (ur. Peckham, R. J.; Jordan, G.), Development and Applications in a Policy Support Environment, Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer, 67-82.
101. Hollaus, M., Aubrecht, C., Höfle, B., Steinnocher, K., Wagner, W., 2011: Roughness mapping on various vertical scales based on full-waveform airborne laser scanning data, *Remote Sensing* 3 (3), 503-523.

102. Hollaus, M., Höfle, B., 2010: Terrain roughness parameters from full-waveform airborne lidar data, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38 (7), 287-292.
103. Holopainen, M.; Haapanen, R.; Karjalainen, M.; Vastaranta, M.; Hyyppä, J.; Yu, X., Tuominen, S.; Hyyppä, H., 2000: Comparing accuracy of airborne laser scanning and TerrSAR-X radar images in the estimation of plot-level forest variables, *Remote Sens.* 2, 432-445.
104. Horn, B. K. P., 1981: Hill shading and the reflectance map, *Proceedings of the IEEE* 69 (1), 14-47.
105. Horvat, S., Železnjak, Ž., Lapaine, M., 2003: Vojni topografsko-kartografski sustav Republike Hrvatske, *Kartografija i Geoinformacije* 2, 75-85.
106. Horvatinec, D., 2008: *Računalno geološko modeliranje gornjopanonskih naftno-plinskih ležišta u savskoj depresiji*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo.
107. Hu, K., Li, B., Lu, Y., Zhang, F., 2004: Comparison of various spatial interpolation methods for non-stationary regional soil mercury content, *Environmental Science* 25 (3), 132-137.
108. Hu, Y., 2003: Automated extraction of digital terrain models, roads and buildings using airborne LiDAR data, *PhD Thesis*, Calgary, Alberta, Canada: Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.
109. Huggel, C., Kaab, A., Haeberli, W., Krummenacher, B., 2003: Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 647-662.
110. Huggel, C., Schneider, D., Miranda, P.J., Delgado Granados, H., Kaab, A., 2008: Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modeling: a case study on lahars from Popocatepetl Volcano, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 170, 99-110.
111. Hutchinson, M. F. 1989: A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits, *Journal of Hydrology* 106, 211-232.
112. Hutchinson, M. F., 1996: A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models, u: *Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, Santa Fe, NM, January 21-26, 1996. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis.

113. Hutchinson, M. F., 1998: Interpolation of Rainfall Data with Thin Plate Smoothing Splines - Part I: Two Dimensional Smoothing of Data with Short Range Correlation, *Journal of Geographic Information and Decision Analysis* 2 (2), 139-151.
114. Hutchinson, M. F., Gallant, J. C., 2000: Digital elevation models and representation of terrain shape, u: *Terrain Analysis: Principles and Applications* (ur. Wilson, J. P; Gallant, J. C.), John Wiley and Sons: New York, NY, 29-50.
115. Hyyppä, H., Yu, X., Hyyppä, J., Kaartinen, H., Honkavaara, E., Rönholm, P., 2005: Factors affecting the quality of DTM generation in forested areas, u: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 12-14 September, Enschede, Netherlands, ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop Laser Scanning 2005, 36 (3/W19), 85-90. http://www.helsinki.fi/~korpela/MINV12/DTM_accuracy.pdf (29.10.2012.)
116. IGU, Commission on applied geomorphology, subcommission on geomorphological mapping 1968: The unified key to the detailed geomorphological map of the world, 1: 25000 – 1: 50000, Folia geografica, series geographica-physica 2, Krakow.
117. IHO, 2005: *Manual of Hydrography*, Publication M-13, 1st edition, International Hydrographic Bureau, Monaco.
118. Ingham, A. E., 1992: *Hydrography for the Surveyor and Engineer*, Third edition, Oxford, Blackwell Scientific Publications, London.
119. Isaaks, E. H., Srivastava, R. M., 1989: *Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York.
120. Jenks, G. F., 1967: The Data Model Concept in Statistical Mapping, *International Yearbook of Cartography* 7, 186-190.
121. Jenks, G. F., Coulson, M. R., 1963: Class intervals for statistical maps, *International Yearbook of Cartography* 3, 119-134.
122. Jenness, J., 2004: Calculating landscape surface area from digital elevation models, *Wildlife Society Bulletin* 32 (3), 829-839.
123. Jenness, J. 2012: DEM Surface Tools, Jenness Enterprises, <http://www.jennessent.com/downloads/DEM%20Surface%20Tools%20for%20ArcGIS.pdf> (21.11.2012.)
124. Jenson, S. K., 1991: Application of hydrologic information automatically extracted from digital elevation models, *Hydrol. Process.* 5 (1), 31-44.
125. Johnston, K., Hoef, J. M. V., Krivoruchko, K., Lucas, N., 2001: *Using ArcGISTM Geostatistical Analyst*, ESRI, Redlands, USA.

126. Jones, K. H., 1998: A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM, *Computers and Geosciences* 24 (4), 315-323.
127. Jong, C. D., Lachapelle, G., Skone, S., Elema, I. A., 2002: *Hydrography*, Delft University Press, Netherlands.
128. Journel, A. G., 1986: Geostatistics: Models and tools for the earth sciences, *Mathematical Geology* 18 (1), 119-140.
129. JUPPVJ, 2010: Plan upravljanja Parkom prirode Vransko jezero, PHARE 2005: Institucionalno jačanje i provedba ekološke mreže NATURA 2000 u Hrvatskoj (ur. Wolfgang, S.), Biograd.
130. Kang, M., 2011: Analysis of the ME70 multibeam echosounder data in echoview – current capability and future directions, *Journal of Marine Science and Technology* 19 (3), 312-321.
131. Karamustafić, A., 2007: Razvoj i stanje terestričkog geodetskog instrumentarija, *Diplomski rad*, Univerzitet u Sarajevu, Građevinski fakultet, Odsjek za geodeziju, Sarajevo.
132. Kaufman, M., Nemet, J., 2011: *Recommended accuracy and update requirements for depth data*, Implementation of River Information Services in Europe, EU.
133. Kearns A., Breman, J., 2010: Bathymetry - The art and science of seafloor modeling for modern applications, u: *Ocean Globe* (ur. Breman J.), Redlands: ESRI Press, 1-36.
134. Kennelly, P. J., 2009: Terrain maps displaying hill-shading with curvature, *Geomorphology* 102, 567-577.
135. Kienzle, S., 2004: The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives, *Transactions in GIS* 8 (1), 83-111.
136. Kilvington, R., 2004: *Good Practice for Hydrographic Surveys in New Zealand Ports and Harbours*, Maritime Safety Authority, New Zealand.
137. Kleijnen, J. P., 2007: *Kriging metamodeling in simulation: A review*, Tilburg University, Tilburg.
138. Knotters, M., Heuvelink, G. B. M., Hoogland, T., Walvoort, D. J. J., 2010: *A disposition of interpolation techniques*, Statutory Research Tasks Unit for Nature and the Environment, WOt-werkdocument, Wageningen.
139. Kongsberg, 2012: <http://www.kongsberg.com/> (15.05.2012.)
140. Krivoruchko, K., Gotway, C. A., 2004: Creating exposure maps using Kriging, *Public Health GIS News and Information* 56, 11-16.

141. Kujundžić, D., 2007: Zračni laserski skeneri LEICA ALS50-II i Corridor Mapper, *Ekscentar* 10, 31-34.
142. Kuspilić, N., 2008: *Hidrotehničke građevine*; Građevine na vodotocima, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
143. Lafferty, B., Quinn, R., Breen, C., 2005: A side-scan sonar and high-resolution Chirp sub-bottom profile study of the natural and anthropogenic sedimentary record of Lower Lough Erne, northwestern Ireland, *Journal of Archaeological Science* 33, 756-766.
144. Lam, N. S., 1983: Spatial interpolation methods: a review, *The American Cartographer* 10 (2), 129-139.
145. Lasić, Z., 2007: *Interna skripta kolegija Geodetski instrumenti*, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
146. Lawrence, M., Oxley, I., Bates, C. R., 2004: Geophysical Techniques for Maritime Archaeological Surveys, ASSEPG, http://www.standrews.ac.uk/rasse/library/pdfs/EEGS_arch_abs.pdf (19.05.2012.)
147. Lazzaro, D., Montefusco, L. B., 2002: Radial basis functions for the multivariate interpolation of large scattered data sets, *Journal of Computational and Applied Mathematics* 140 (1-2), 521-536.
148. Ledoux, H., Gold, C., 2004: An Efficient Natural Neighbour Interpolation Algorithm for Geoscientific Modelling, u: *Developments in Spatial Data Handling—11th International Symposium on Spatial Data Handling* (ur. Fisher, P.), Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 97-108.
149. Legendre, P., Legendre, L., 1998: *Numerical Ecology*, Elsevier, Amsterdam.
150. Li, J., Chen, C. S., 2002: A simple efficient algorithm for interpolation between different grids in both 2D and 3D, *Mathematics and Computers in Simulation* 58 (2), 125-132.
151. Li, J., Heap, A. D., 2008: *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*, Geoscience Australia, Record 2008/23, Canberra.
152. Li, Z., Zhu, Q., Gold, C., 2005: *Digital Terrain Modeling*, CRC Press, London.
153. Lilja, J., 2004: Assessment of Fish Migration in Rivers by Horizontal Echo Sounding, *Doctoral Thesis*, Faculty of Mathematics and Science, University of Jyväskylä.
154. Lin, S., Jing, C., Chaplot, V., Yu, X., Zhang, Z., Moore, N., Wu, J., 2010: Effect of DEM resolution on SWAT outputs of runoff, sediment and nutrients, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 4 (7), 4411-4435.
155. Lloyd, C. D., Atkinson, P. M., 2002: Deriving DSMs from LiDAR data with kriging, *International Journal of Remote Sensing* 23 (12), 2519-2524.

156. Lozić, S., 2000.: Kvantitativne geomorfološke značajke Sjeverozapadne Hrvatske, *Disertacija*, PMF - Geografski odsjek, Zagreb.
157. Luo, W., Taylor, M. C., Parker, S. R., 2007: Spatial interpolation for wind data in England and Wales, <http://internet.csl.gov.uk/wind.pdf> (26.09.2012.).
158. Luo, W., Taylor, M. C., Parker, S. R., 2008: A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales, *International Journal of Climatology* 28 (7), 947-959.
159. Lurton, X., 2002: *An Introduction to Underwater Acoustics; Principles and Applications*, Springer.
160. Mackenzie, K. V., 1981: Nine-term equation for sound speed in the oceans, *Journal Acoustic Society of America* 70 (3), 807-812.
161. Makarović, B., 1977: Composite sampling for digital terrain models, *ITC Journal* 3, 406-433.
162. Makarović, B., 1979: From progressive to composite sampling for digital terrain models, *Geo-Processing* 1, 145-166.
163. Malvić, T., 2005: Kriging-geostatistička interpolacijska metoda, http://www.geologija.hr/pdf/Kriging_2.izd..pdf (28.09.2012.)
164. Malvić, T., 2008: *Primjena geostatistike u analizi geoloških podataka*, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.
165. Malvić, T., Balić, D., 2009: Linearnost i Lagrangeov linearni multiplikator u jednadžbama običnoga kriginga, *Nafta* 59 (1), 38-43.
166. Malvić, T., Gaćeša, S., 2006: Geostatistika u opisivanju ležišta ugljikovodika, INA – industrija nafte, <http://bib.irb.hr/datoteka/382718.UVODNI.pdf> (09.09.2012.)
167. Malvić, T., Saftić, B., 2008: *Dubinsko kartiranje*, Fakultetska skripta, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo, Zagreb.
168. Margreth, S., Funk, M., 1999: Hazard mapping for ice and combined snow/ice avalanches - two case studies from the Swiss and Italian Alps, *Cold Regions Science and Technology* 30 (1-3), 159-173.
169. McBratney, A. B., Webster, R., 1986: Choosing Functions for Semi-variograms of Soil Properties and Fitting Them to Sampling Estimates, *Journal of Soil Science* 37 (4), 617-639.
170. McCullagh, M. J., 1988: Terrain and surface modelling systems: theory and practice, *Fotogrammetric Record* 12 (72), 747-779.

171. McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M. D., Ene, E., 2002: FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Computer software program produced at the University of Massachusetts, Amherst, www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html. (18.09.012.)
172. McGarigal, K., Marks, B. J., 1995: *FRAGSTATS: spatial analysis program for quantifying landscape structure*, USDA Forest Service General Technical Report PNW-GTR-351, US Dept. Of Agriculture, Forest Service Pacific NW Research Station, Portland, Oregon.
173. Medak, D., 2009: Geostatistika, Analiza prostornih podataka, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, <http://www2.geof.unizg.hr/~dmedak/hr/geostatistika.pdf> (15.8.2012.)
174. Medak, D., Pribičević, B., Krivoručo, K., 2008: Geostatistička analiza batimetrijskih mjerenja na primjeru jezera Kozjak, *Geodetski list* 62 (85), 131-142.
175. Medved, I., Pribičević, B., Medak, D., Kuzmanić, I., 2010: Usporedba metoda interpolacije batimetrijskih mjerenja za praćenje promjena volumena jezera, *Geodetski list* 68 (2), 71-86.
176. Medwin, H., 1975: Speed of sound in water: a sample equation for realistic parameters, *Journal Acoustic Society of America* 58, 1318-1319.
177. Mechelke, K., Kersten, T. P., Lindstaedt, M., 2007: Comparative Investigations into the Accuracy Behavior of the New Generation of Terrestrial Laser Scanning Systems, <http://dev.cyark.org/temp/hcuahamburgmechelkeetal2007.pdf> (22.10.2012.)
178. Meyer, W., 1995: *Concepts of Mathematical Modelling*, McGraw-Hill Book Company, New York.
179. Miler M., Đapo A., Kordić B., Medved I., 2007: Terestrički laserski skeneri, *Ekscentar* 10, 35-38.
180. Millaresis, G. C., Argialas, D. P., 2000: Extraction and delineation of alluvial fans from digital elevation models and Landsat Thematic Mapper images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66 (9), 1093-1101.
181. Miller, C., Laflamme, R., 1958: The digital terrain model — theory and applications, *Photogrammetric Engineering* 24, 433-442.
182. Miloš, B., 2000: Geostatistical Soil Data Analysis, *Agriculturae Conspectus Scientificus* 65 (4), 219-228.
183. Mitas, L., Mitasova, H., 1999: Spatial Interpolation, u: *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications* (Second edition) (ur. Longley, P.; Goodchild, M. F.; Maguire, D. J.; Rhind, D. W.), Wiley, Chichester 481-492.

184. Mitasova, H. L., Hofierka, J., Zlocha, M., Iverson, L. R., 1996: Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS, *International Journal of Geographical Information Systems* 10 (5), 629-641.
185. Mitasova, H., Mitas, L., 1993: Interpolation by regularized spline with tension, Theory and implementation, *Mathematical Geology* 25 (6), 641-655.
186. Mitrović, M., Cvijetinović, Ž., Mihajlović, D., 2012: Razvoj digitalne fotogrametrijske stanice, <http://www.mapsoft.rs/dev/news/pdf/razvoj-digitalne-fotogrametrijske-stanice.pdf>
187. Mohamed, G. A. I., Masaad, E. M., Awadelgeed, A. M., 2011: Impact of Spatial Interpolation Methods on Digital Elevation Models Quality, *UofKEJ* 1 (2), 29-39.
188. Moore, I. D., Gessler, P. E., Nielsen, G. A., Peterson, G. A., 1993: Soil attribute prediction using terrain analysis, *Soil Science Society of America Journal* 57 (2), 443-452.
189. Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R., 1991: Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrological Processes* 5, 3-30.
190. Moore, I. D., O'Loughlin, E. M., Burch, G. J., 1988: A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications, *Earth Surface Processes and Landforms* 13 (4), 305-320.
191. Naoum, S., Tsanis, I. K., 2004: Ranking spatial interpolation techniques using a GIS-based DSS, *Global Nest: the International Journal* 6 (1), 1-20.
192. Negreiros, J., Painho, M., Aguilar, F., 2008: Principles of Deterministic Spatial Interpolators, *Polytechnical Studies Review* 6 (9), 281-290.
193. Nellemann, C., Fry, G., 1995: Quantitative analysis of terrain ruggedness in reindeer winter grounds, *Arctic* 48 (2), 172-176.
194. NOAA, 1976: *Hydrographic Manual*, 4th edition, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Department of Commerce.
195. Ohlmacher, G. C., 2007: Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides, *Engineering Geology* 91 (2-4), 117-134.
196. Oksanen, J., 2006: Digital Elevation model Error in Terrain Analysis, *Doctoral Thesis*, Faculty of Science, University of Helsinki, Helsinki.
197. Olaya, V., 2009: Basic land surface parameters, u: *Geomorphometry – Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science* (ur. Hengl, T., Reuter, H. I.), Elsevier, Amsterdam, 141-169.

198. Oliver, M. A., Webster, R., 1990: Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems, *International Journal of Geographic Information Systems* 4 (3), 313-332.
199. Ožanić, N., 2002: *Hidrotehničke regulacije*, Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku i geotehniku, Sveučilište u Rijeci, Rijeka.
200. Pahernik, M., 2007: Digital Analysis of the Slopes of Rab Island, *Geoadria* 12 (1), 3-22.
201. Palata, D., 2003: Newton-Cotesove formule numeričke integracije, https://www.google.hr/search?q=newton+cotesove+formule&hl=hr&authuser=0#hl=hr&authuser=0&client=psyab&q=newton+cotesove+formule+palata&oq=newton+cotesove+formule+palata&gs_l=serp.3...136049.137454.0.138047.7.7.0.0.0.186.1094.0j7.7.0..0.0..1c.1.11.psyab.UVxALQl_F0s&pbx=1&bav=on.2.or.r_qf.&fp=74a03ab11d24c170&biw=1360&bih=589 (02.10.2012.)
202. Pearlstine, L., Higer, A., Palaseanu, M., Fujisaki, I., Mazzotti, F., 2011: *Spatially Continuous Interpolation of Water Stage and Water Depths Using the Everglades Depth Estimation Network (EDEN)*, IFAS, University of Florida, Florida.
203. Pebesma, E. J., 2004: Multivariable geostatistics in S: the gstat package, *Computer & Geosciences* 30 (7), 683-691.
204. Peralvo, M., 2003: Influence of DEM interpolation methods in drainage analysis, <http://www.crwr.utexas.edu/gis/gishydro04/introduction/termprojects/peralvo.pdf> (29.10.2012.).
205. Pickrill, R. A., Todd, B. J., 2003: The multiple roles of acoustic mapping in integrated ocean management, Canadian Atlantic continental margin, *Ocean and Coastal Management* 46 (6) 601-614.
206. Pike, R. J., 1995: Geomorphometry - progress, practice and prospect, *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband* 101, 221-238.
207. Pike, R. J., 2000: Geomorphometry - diversity in quantitative surface analysis, *Progress in Physical Geography* 24 (1), 1-20.
208. Pike, R. J., Evans, I. S., Hengl, T., 2009: Geomorphometry: A brief guide, u: *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications* (ur. Hengl, T., Reuter, H. I.), Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, ser. Developments in Soil Science, 3-30.
209. Pipal, K., Jessop, M., Boughton, D., Adams, P., 2010: Using dual-frequency identification sonar (DIDSON) to estimate adult steelhead escapement in the San Lorenzo River, California, *Calif Fish Game* 96, 90-95.

210. Pohjola, J., Turunen, J., Lipping, T., 2009: *Creating High-Resolution Digital Elevation Model Using Thin Plate Spline Interpolation and Monte Carlo Simulation*, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland.
211. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P., 1988: *Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, New York.
212. Pribičević, B., Medak, D., Kordić, B., 2007: Primjena dvofrekventne batimetrije u određivanju sedrenih naslaga, *Geodetski list* 1, 1-18.
213. Rashid, M. F. F. Ab., Abdul Lani, M. R., 2010: Surface Roughness Prediction for CNC Milling Process using Artificial Neural Network, u: *Proceedings of the World Congress on Engineering 2010*, 30 lipnja – 2 srpnja 2010, WCE 2010, London, UK.
214. Reutebuch, S., Andersen, H. E., McGaughey, R., 2005: LIDAR: An emerging tool formultiple resource inventory, *Journal of Forestry* 103 (6), 286-292.
215. Richards, M. A., 2007: A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing, *IEEE A&E Systems Magazine* 22 (9), 5-29.
216. Riley, S. J., De Gloria, S.D., Elliot, R., 1999: A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity, *Intermountain Journal of Sciences* 5 (1-4), 23-27.
217. Ripley, B. D., 1981: *Spatial Statistics*, John Wiley & Sons, New York.
218. Rippa, S., 1999: An algorithm for selecting a good value for the parameter c in radial basis function interpolation, *Advances in Computational Mathematics* 11 (2-3), 193-210.
219. Robertson, G. P., 2000: *GS⁺: Geostatistics for the Environmental Science*, Gamma design Software, Plainwell, Michigan USA.
220. Rodríguez, J. G., Suarez, M. G., 2010: Comparison of mathematical algorithms for determining the slope angle in GIS environment. Aqua-LAC, *Journal of the International Hydrological Programme for Latin America and the Caribbean (UNESCO-International Hydrological Programme)* 2 (2), 78-82.
221. Royle, A. G., Clausen, F. L., Frederiksen, P., 1981: Practical Universal Kriging and Automatic Contouring, *Geoprocessing* 1, 377-394.
222. Rusu, C., Rusu, V., 2010: Radial Basis Functions Versus Geostatistics in Spatial Interpolations, http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/23875/Documento_completo.pdf?sequence=1 (25.9.2012.)
223. Ruszkiczay-Rudiger, Z., Fodor, L., Hovath, E., Telbisz, T., 2009: Discrimination of fluvial, eolianand neotectonic features in a low hilly landscape: a DEM-based

- morphotectonic analysis in the Central Pannonian Basin, Hungary, *Geomorphology* 104, 203-217.
224. Saito, H., Seki, K., Šimunek, J., 2009: An alternative deterministic method for the spatial interpolation of water retention parameters, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13, 453-465.
225. Samonig, N., 2001: *Parallel Computing in Spatial Statistics*, Graduate work, University of Klagenfurt, Klagenfurt.
226. Sangam, S., 2012: Light Detection and Ranging, http://scholar.google.hr/scholar?q=related:rYglNuk0GksJ:scholar.google.com/&hl=hr&as_sdt=0,5 (12.10.2012)
227. Sarra, S. A., Kansa, E. J., 2009: Multiquadric Radial Basis Function Approximation Methods for the Numerical Solution of Partial Differential Equations, *Advances in Computational Mechanics* 2, 1-220.
228. Savigear, R. A. G., 1952: Some observations on slope development in South Wales, *Trans. and Papers IBG* 18, 31-51.
229. Savigear, R. A. G., 1956: Techniques and terminology in the investigation of slope forms, Premier Rapport de la Commission pour L'Etude des Versants, Union Geographique Internationale, 66-75.
230. Scheuerer, M., Schaback, R., Schlather, M., 2011: Interpolation of Spatial Data – A Stochastic or a Deterministic Problem?, *Journal of Applied Mathematics*, <http://num.math.uni-goettingen.de/schaback/research/papers/IoSD.pdf> (01.09.2012.)
231. Schloeder, C. A., Zimmerman, N. E., Jacobs, M. J., 2001: Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data, *Soil Science Society of American Journal* 65 (2), 470-479.
232. Schmidt, J., Evans, I. S., Brinkmann, J., 2003: Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation, *International Journal of Geographical Information Science* 17 (8), 797-814.
233. Schulze, B., 2010: *Hydrographic Echosounder Hydrostar 4300*; Technical Manual TH 52 596 8001 E, ELAC Nautik, Kiel, Germany.
234. Sciortino, J. A., 2010: *Fishing harbour planning, construction and management*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
235. Sharpnack, D. A., Akin, G., 1969: An algorithm for computing slope and aspect from elevations, *Photogrammetric Engineering* 35 (3), 247-248.
236. Shary, P. A., Sharaya, L. S., Mitusov, A. V., 2002: Fundamental quantitative methods of land surface analysis, *Geoderma* 107 (2), 1-32.

237. Shaw, J., You, Y., Haberman, R., Maidment, D., 2009: *Geostatistical Analysis*, CE 397 Statistics in Water Resources, Exercise 9, University of Texas at Austin.
238. Sheikhhasan, H., 2006: A Comparison of Interpolation Techniques for Spatial Data Prediction, *Master's Thesis in Computer Science*, Faculty of Science, Universiteit van Amsterdam, The Netherlands.
239. Shibli, S. A. R., 2003: Geostatistics FAQ – Frequently asked questions: Definitions and explanations of the mains terms and concepts used in geostatistics, http://www.aigeostats.org/pub/AI_GEOSTATS/AI_GEOSTATSFAQ/FAQ_Geostatistics_01.pdf (09.09.2012.)
240. Sinclair, M., 2008: Airborne Lidar Hydrographic Survey for Homeland Security, Remote, Uncharted Areas in Torres Strait Present Unique Challenges to the Hydrographic Surveyor, [http://www.fugrolads.com/download/136675/STF-Torres Strait.pdf](http://www.fugrolads.com/download/136675/STF-Torres_Strait.pdf) (01.05.2012.)
241. Skala, V., 2010: Radial Basis Functions Interpolation and Applications: An Incremental Approach, ASM 2010 Conference, NAUN, Corfu, Greece, 209-213, http://herakles.zcu.cz/~skala/PUBL/PUBL_2010/2010_Corfu-NAUN-RBF.pdf (26.09.2012.)
242. Skøien, J. O., Merz, R., Bloschl, G., 2005: Top-kriging – geostatistics on stream Networks, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2, 2253-2286.
243. Skøien, J. O., Merz, R., Bloschl, G., 2006: Top-kriging – geostatistics on stream Networks, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10, 277-287.
244. Smith, S. L, Holland, D. A, Longley, P. A., 2003: *Interpreting Interpolation: The Pattern of Interpolation Errors in Digital Surface Models Derived from Laser Scanning Data*, CASA Working Paper 66, Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London, London.
245. Smith, S. L, Holland, D. A, Longley, P. A., 2005: Quantifying interpolation errors in urban airborne laser scanning models, *Geographical Analysis* 37 (2), 200-224.
246. Soenario, I., Plieger, M., Sluiter, R., 2010: *Optimization of Rainfall Interpolation*, Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), De Bilt, Netherlands.
247. Soycan, M., Soycan, M., 2009: Digital Elevation Model Production from Scanned Topographic Contour Maps Via Thin Plate Spline Interpolation, *The Arabian Journal for Science and Engineering Science* 34 (1a), 121-134.

248. Stephen, J. V., Irvin, B. J., 2000: Automated landform classification methods for soil-landscape studies, u: *Terrain Analysis: Principles and Application* (ur. Wilson, J. P., Gallant, J. C.), John Wiley & Sons Press: New York, New York, 267-294.
249. Sties, M., Kruger, S., Mercer, J. B., Schnick, S., 2000: Comparison of digital elevation data from airborne laser and interferometric SAR systems, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33 (3), 866-873.
250. Svobodava, J., 2011: Selection of Appropriate Interpolation Methods for Creation DEMs of Various Types of Relief by Copplex approach to Assessment of DEMs, GIS Ostrava 2011, January 23 - 26 2011, Ostrava, http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2011/sbornik/papers/Svobodova.pdf (02.10.2012.)
251. Šljivarić, M., 2001: Integracija RTK-GPS-a i dubinomjera u mjerni sustav za nadzor riječnih plovnih putova, *Magistarski rad*, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
252. Takagi, M., Asano, H., Kikuchi, Y., 2002: Optimum Spatial Resolution of Digital Elevation Model for Topographical Analysis, u: *International Symposium on Geospatial Theory*, Ottawa, <http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/part4/pdfpapers/298.pdf> (02.11.2012)
253. Talmi, A., Gilat, G., 1977: Method for smooth approximation of data, *Journal of Computational Physics* 23 (2), 93-123.
254. Tankagi, M., 1996: Accuracy of Digital Elevation Model According to Spatial Resolution, <http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS1996/Papers/GEO96-2.htm> (02.11.2012)
255. Tarboton, D. G., 1997: A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resource Reserch* 33 (2), 309-319.
256. Thales Navigation, 2012: *Z-Max.Net; Reference Manual*, Thales Navigation, La Fleuriaye, France.
257. Thompson, J. A., Bell, J. C., Butler, C. A., 2001: Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modelling, *Geoderma* 100 (1-2), 67-89.
258. Tobler, W., 1970: A computer movie simulating urban growth in the Detroit region, *Economic Geography* 46 (2), 234-240.
259. Tomczak, M., 1998: Spatial Interpolation and its Uncertainty Using Automated Anisotropic Inverse Distance Weighting (IDW) - Cross-Validation/Jackknife Approach, *Journal of Geographic Information and Decision Analysis* 2 (2), 18-30.

260. Travis, M. R., Elsner, G. H., Iverson, W. D., Johnson, C. G., 1975: *VIEWIT computation of seen areas, slope and aspect for land-use planning*, U.S. Dept. of Agriculture Forest Service Gen. Techn. Rep. PSW 11/1975. Pacific Southwest Forest and Range Experimental Station, Berkley, California.
261. Tucker, G. E., Catani, F., Rinaldo, A., Bras, R. L. 2001: Statistical analysis of drainage density from digital terrain data, *Geomorphology* 36 (3-4), 187-202.
262. UNESCO, 1983: Algorithms for computation of fundamental properties of seawater, u: *UNESCO Technical Papers in Marine Science* (ur. Fofonoff, N. P., Millard, R.C), Unesco/SCOR/ICES/IAPSO.
263. Unger, J. F., 2003: Development of an efficient algorithm for the application of the “Natural Neighbor Interpolation” for crack growth simulations, *Diploma thesis*, Bauhaus-University Weimar, Germany.
264. USACE, 2002: *Engineering and Design - Hydrographic Surveying*, EM 1110-2-1003, http://publications.usace.army.mil/publications/eng-manuals/EM_1110-21003_pfl/toc.htm (28.05.2012.)
265. Wahba, G. 1990: *Spline models for Observational data*, Soc. Ind. Appl. Maths., Philadelphia.
266. Watson, D. F., 1992: *Contouring: A Guide to the Analysis and Display of Spatial Data*, Pergamon Press, Oxford, UK.
267. Webster, R., Oliver, M. A., 2001: *Geostatistics for Environmental Scientists*, 1st Edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
268. Webster, R., Oliver, M. A., 2007: *Geostatistics for Environmental Scientists*, 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
269. Wehr, A., Lohr, U., 1999: Airborne laser scanning an introduction and overview, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 54, 68-82.
270. Weibel, R., Heller, M., 1991: Digital terrain modelling, u: *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, Vol. 1: Principles (ur: Maguire, D. J., Goodchild, M. F., Rhind, D.), Longman, Harlow.
271. Weng, Q., 2006: An evaluation of spatial interpolation accuracy of elevation data, u: *Progress in Spatial Data Handling* (ur. Riedl, A., Kainz, W., Elmes, G. A.), Springer-Verlag, Berlin, 805-824.
272. Wienberg, C., Dannenberg, J., Hebbeln, D., 2004: The fate of dumped sediments monitored by a high-resolution multibeam echo-sounder system, Weser Estuary, German Bight, *Geo-Marine Letters* 24 (1), 22-31.

273. Wilson, J. P., Gallant, J. C. 2000a: Digital terrain analysis, u: *Terrain analysis: principles and applications* (ur. Wilson, J. P., Gallant, J. C.), John Wiley and Sons: New York, New York, 1-27.
274. Wilson, J. P., Gallant, J., C. 2000b: Secondary terrain attributes, u: *Terrain analysis: principles and applications* (ur. Wilson, J. P.; Gallant, J. C.), John Wiley and Sons: New York, New York, 87-132.
275. Wilson, J., 2011: Digital terrain modeling, *Geomorphology* 137 (1), 269-297.
276. Wilson, W. D., 1960: Equation for the speed of sound in sea water, *Journal Acoustic Society of America* 32 (10), 1357-1357.
277. Wood, J. D., 1996: The geomorphological characterisation of digital elevation models, PhD Thesis, University of Leicester, UK, <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd>. (10.11.2012.)
278. Wu, J., Marceau, D., 2002: Modeling complex ecological systems: an introduction, *Ecological Modelling* 153, 1-6.
279. Yang, C. S., Kao, S. P., Lee, F. B., Hung, P. S., 2004: *Twelve Different Interpolation Methods: a Case Study of Surfer 8.0*, ISPRS, 778-783.
280. Yang, X., 2009: Spatial Interpolation, u: *Handbook of Research on Geoinformatics* (ur.. Karimi, H. A.), Information Science Reference, Hershey - New York, 129-137.
281. Yang, X., Hodler, T., 2000: Visual and statistical comparisons of surface modeling techniques for point-based environmental data, *Cartography and Geographic Information Science* 27 (2), 165-175.
282. Yasrebi, J., Saffari, M., Fathi, H., Karimian, N., Moazallahi, M., Gazni, R., 2009: Evaluation and Comparison of Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighting Methods for Prediction of Spatial Variability of Some Soil Chemical Parameters, *Research Journal of biological Sciences* 4 (1), 93-102.
283. Young, A., 1964: Slope profile analysis, *Zeitschrift für geomorphologie* 5, 17-27.
284. Young, A., 1971: Slope profile analysis: the system of best units, in: *Slopes Form and Process* (ed. Brunson, D.), Institute of British Geographers, Special Publication 3, London, 1-13.
285. Zevenbergen, L. W., Thorne, C. R., 1987: Quantitative analysis of land surface topography, *Earth Surface Processes and Landforms* 12, 47-56.
286. Zhou, Q., Liu, X., 2004a: Error analysis on grid-based slope and aspect algorithms, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 70 (8), 957-962.

287. Zhou, Q., Liu, X., 2004b: Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties, *Computers and Geosciences* 30 (4), 369-378.
288. Ziadat, F. M., 2007: Effect of Contour Intervals and Grid Cell Size on the Accuracy of DEMs and Slope Derivatives, *Transactions in GIS* 11 (1), 67-81.

Izvori:

Državna geodetska uprava, Digitalni model reljefa - vektorski podatci o visinama prikupljeni fotogrametrijskom izmjerom i restitucijskom obradom, listovi šireg područja PP Vransko jezero.

Državna geodetska uprava, Digitalni ortofoto, listovi šireg područja PP Vransko jezero.

Državna geodetska uprava, 2003: Specifikacija proizvoda: Digitalni model reljefa, CRONO GIP, Zagreb.

Državna geodetska uprava, Hrvatska osnovna karta - mjerilo 1:5000, listovi šireg područja PP vransko jezero.

ESRI, ArcGIS Desktop 10.1.

Fabulić, M., 2012: Softver za filtriranje podatka o dubinama, Geodetski ured Teodolit, Zadar.

Jeleska, S., 2010: Karta staništa PP Vransko jezero u mjerilu 1:5000, Park prirode Vransko jezero.

JUPPVJ, 2010: Plan upravljanja Parkom prirode Vransko jezero, PHARE 2005: Institucionalno jačanje i provedba ekološke mreže NATURA 2000 u Hrvatskoj (ur. Wolfgang, S.), Biograd.

Kongsberg, 2012: <http://www.kongsberg.com/> DOF, svibanj 2012.

URL 1: <http://www.vecernji.hr/regije/najveci-pomor-vranskom-jezeru-uginulo-gotovo-tonu-ribe-clanak-407822>, srpanj 2012.

URL 2: <http://www.zastita-prirode.hr/Zasticena-priroda/Vrste-i-stanista/Stanista>, lipanj 2012.

ŽIVOTOPIS

Rođen 10. prosinca 1982. godine u Metkoviću, Hrvatska. Osnovno i gimnazijsko obrazovanje stekao je u Metkoviću. Na Filozofskom fakultetu u Zadru Sveučilišta u Splitu akademske godine 2001/2002. god. upisao je studij povijesti i geografije, kojeg je završio 2007. Iste godine upisao je poslijediplomski studij *Geografske osnove prostornog planiranja i uređenja* na Geografskom odsjeku PMF-a Sveučilišta u Zagrebu. Zaposlio se u lipnju 2007. godine na Odjelu za geografiju Sveučilišta u Zadru kao asistent.

Aktivno sudjeluje u organizaciji i izvođenju nastave, vježbi i seminara iz kolegija Digitalna kartografija, GIScience - znanost o geoprostornim informacijama, Primjena GIS-a u prostornom planiranju, Geoaspekti regionalizacije i prostornog planiranja, Daljinska istraživanja i Politička geografija.

Kao suradnik 2008/2009. uključen je na projekt *Izgradnja sustava indikatora održivog urbanog razvoja za odabrane primorske gradove Zadar i Pulu*, voditelja prof. dr. sc. Branka Cavrića. U razdoblju od srpnja do studenog 2009. godine odlazi na studijski boravak na Odjel za prostorno planiranje i arhitekturu Sveučilišta u Botswani, gdje se stručno usavršava, izvodi nastavu (vježbe) i sudjeluje u izradi razvojnog prostornog plana za selo Mmanoko. Od 2010. surađuje na projektu *Kretanje stanovništva, naseljenosti i naselja u Dalmatinskoj zagori (Južna Hrvatska)*, voditelja prof. dr. sc. Martina Glamuzine. Od 2012. Godine surađuje na projektu *Hrvatski priobalni krški prostor - geomorfološke i ekološke značajke*, voditelja prof. dr. sc. Dražena Perice.

Na Učiteljskom fakultetu u Čakovcu od 2010. do 2012. godine predaje kolegij Opća geografija.

Završio je više GIS tečajeva i napredno koristi GIS tehnologiju. Do 2013. godine objavio je ukupno 13 znanstvenih radova i aktivno sudjelovao u radu više međunarodnih i domaćih znanstvenih radionica, seminara, skupova, simpozija i kongresa. Govori, čita i piše engleski jezik. Član je Hrvatskog geografskog društva i Instituta za GIS. Dobitnik je nagrade *Frederic Grisogono* za najboljeg studenta na Odjelu za geografiju. Oženjen je i otac jednog djeteta.

POPIS RADOVA

Znanstveni radovi u ostalim časopisima

- Jurišić, M., Frangeš, S., Plaščak, I., Šiljeg, A., 2013: Methodology of Development of Purpose Maps in GIS Environment – Resource Management, *Geodetski list: glasilo Hrvatskoga geodetskog društva* 67 (90), 1-12.
- Radoš, D., Lozić, S., Šiljeg, A., Jurišić, M., 2013: Features of Slope Inclination and Planar Curvatures of the broader Area of Duvanjsko polje, *Geodetski list: glasilo Hrvatskoga geodetskog društva* 66 (89), 273-301.
- Cavrić, B., Toplek, S., Šiljeg, A., 2008: Participatory Measurements of Sustainable Urban Development and Quality of Life in Post-socialist Zadar, Croatia, *Spatium* 17-18, 45-54.
- Lozić, S., Šiljeg, A., Krklec, K., Šiljeg, S., 2012: Vertical landscape structure of the southern part of Vis Island, Croatia, *Dela* 37, 65-90.
- Radoš, D., Šiljeg, A., Lozić, S., 2012: Morfometrijske značajke šireg područja Duvanjskog polja, Bosna i Hercegovina, *Geoadria* 17 (2), 177-207.
- Krklec, K., Lozić, S., Šiljeg, A., 2012: Geomorfološke značajke otoka Visa, *Naše more: znanstveni časopis za more i pomorstvo* 59 (5-6), 290-300.
- Šiljeg, A., Šiljeg, S., Šiljković, Ž., 2010: Conditions and Development Tendencies of Touristic Offer Kupres Municipality (Bosnia and Herzegovina), *Geoadria* 15 (2), Zadar, 305-325.

Znanstveni radovi u zbornicima

- Radoš, D., Šiljeg, A., Lozić, S., 2012: Primjena GIS metoda u analizi geomorfometrijskih značajki Duvanjskog polja, *Zbornik radova Znanstveno-stručnog skupa Čovjek i krš* (ur. Lučić, I.; Mulaomerović, J.), 13.-16. listopada 2011., Međugorje - Sarajevo: Fakultet društvenih znanosti dr. Milenka Brkića Sveučilišta Hercegovina, Međugorje i Centar za krš i speleologiju, Sarajevo, 143-161.
- Šiljeg, A., 2010: Application of the GIS Technology in Geographical Analysis: An Example of the Island of Vis (Croatia), in: *Proceedings of the International Symposium Geoecology – XXI Century, Theoretical and applicative tasks*, 21-24 September 2010, Žabljak-Nikšić, Montenegro, 453-463.
- Cavrić, B., Šiljeg, A., Toplek, S., 2009: The Roles of Urban Indicators in Measuring the Quality of Urban Life in Post-socialist City: A Case study of Zadar, Croatia, in: *Proceedings 2nd Congress Geographers of Bosnia and Hercegovina* (ed. Muriz, S.),

Sarajevo, 428-460.

- Glamuzina, M., Glamuzina, N., Šiljeg, A., 2009: Demographic Aspect of the Rural Areas of the Middle Dalmatian Hinterland, in: *Proceedings of the I. International Scientific Symposium on Geography, Transformation of Rural Area in the Conditions of Transition and Integration into the European Union*, 7-10 May 2009, Kupres, 315-330.
- Cavrić, B., Toplek, S., Šiljeg, A., 2008: Measuring Sustainable Urban Development in Selected Coastal Cities of Croatia: An Indicator and GIS Based Approach for Cities of Zadar and Pula, in: *Proceedings of the COASTAL CITIES SUMMIT: Values and Vulnerabilities*, 17-19 November 2008, St. Petersburg, Florida, USA.
- Toplek, S., Šiljković, Ž., Šiljeg, A., 2007: Demografska dimenzija vrednovanja prostornih resursa na području Grada Čakovca, u: *Zborniku 4. hrvatskog geografskog kongresa* (ur. Bajs, Lj, Filipčić, A.), 10.-13. listopada 2007, Poreč, 235-249.