

VPLIV VELIKOSTI MREŽNE CELICE IN METOD INTERPOLACIJ NA IZRAČUNANO PROSTORNINO

IMPACT OF THE GRID CELL SIZE AND INTERPOLATION METHODS ON EARTHWORK VOLUME CALCULATION

Tilen Urbančič, Vid Grahor, Božo Koler

UDK: 528.715:528.412
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.02
Prispelo: 12.2.2015
Sprejeto: 22.5.2015

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2015.02.231-245
REVIEW ARTICLE
Received: 12.2.2015
Accepted: 22.5.2015

IZVLEČEK

Tehnologije množičnega zajema prostorskih podatkov iz zraka v primerjavi s klasično detajlno izmero omogočajo hitrejšo pridobitev večje količine kakovostno primerljivih podatkov. Tako se pri določevanju prostornin deponij ali izkopov gradbenega materiala vse pogosteje uporablja fotogrametrično snemanje z brezpilotnimi letalniki. Obdelava fotografij z metodami večslikovnega ujemanja omogoča pridobitev oblaka točk velike gostote. Filtriran oblak točk je vhodni podatek za izračun prostornin. Prostornino med ploskvama izračunamo z metodo primerjav ploskev dveh terminkih izmer, izdelanih z mrežo nepravilnih trikotnikov (TIN) ali celično mrežo. V prispevku analiziramo vpliv različnih metod za interpolacijo ploskev ter velikosti kvadratnih mrežnih celic na izračun prostornine. Referenčna količina je prostornina, določena iz ploskev mreže TIN. Kot dobre interpolacijske metode in primerne velikosti mrežnih celic določimo tiste, pri katerih se izračunana prostornina iz celičnih modelov površja od referenčne količine razlikuje za manj kot 5 %.

KLJUČNE BESEDE

brezpilotni letalniki, celična mreža, mreža TIN, metode interpolacij, prostornina

ABSTRACT

Technologies of massive spatial data acquisition from air, compared to a classical terrain measurement, enables an acquisition of large amounts of data in shorter time and with comparable quality. Unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry is increasingly used in the area of the earthwork volumes determination of landfill or excavation of the building material. Dense multi-image matching obtains high-density point cloud. The input data for the earthwork volumes calculations is a filtered point cloud. The earthwork volume calculations are calculated with the method of surface comparisons of two term measurements, created by a triangulated irregular network (TIN) or grid network. The impacts of different methods for surface interpolation and grid cell size on the earthwork volume calculation are analysed. Reference quantity is the volume, calculated from TIN surfaces. Good interpolation methods and appropriate grid cell sizes are determined with the comparison of volumes from grid and TIN surfaces. The difference between volumes should not exceed 5%.

KEY WORDS

unmanned aerial vehicle, grid cell, TIN, interpolation methods, earthwork volume

1 UVOD

Tehnologije za množični zajem prostorskih podatkov, na primer aero ali terestrično lasersko skeniranje in fotogrametrično snemanje z brezpilotnim letalnikom (angl. unmanned aerial vehicle – UAV), omogočajo zajem prostorskih podatkov z zelo veliko gostoto. Velika količina podatkov marsikdaj celo povzroča težave v postopkih obdelave. Tako je tudi pri geodetskih izmerah za določitev prostornin, na primer deponij gradbenega materiala ali izkopov gradbenih jam. V takih primerih se podobno kot pri izdelavi digitalnega modela površja (DMP) ali digitalnega modela reliefa (DMR) za oblikovanje ploskve uporabljajo različne metode interpolacij. Z interpolacijo dobimo topološko urejeno obliko ploskve, običajno zapisano v obliki pravilne celične mreže (grid). Poleg interpoliranih višin točk celične mreže lahko z interpolacijo določimo višino tudi naključno izbrani točki.

Za raziskavo smo se odločili, ker je izračunana prostornina velikega pomena pri obračunavanju stroškov izvedenih zemeljskih del za večje gradbene projekte. Raziskava vključuje analizo rezultatov izračuna prostornin za pet interpolacijskih metod: metodo inverzne razdalje, metodo naravnih sosedov, metodo navadnih zlepkov, empirični Bayesov kriging in metodo trend (Mitaš in Mitašova, 1999; Johnston et al., 2001). Številni avtorji so že analizirali vpliv izbora interpolacijske metode na iskan rezultat. Tako sta na primer Bielecka in Bober (2013) analizirali vpliv uporabe različnih metod interpolacij pri izdelavi karte časovne dostopnosti na primeru Varšave. Kar nekaj avtorjev je opravilo analizo različnih metod interpolacij na kakovost izdelanega digitalnega modela višin (npr. Gumus in Sen, 2013; Garnero in Godone, 2013; Bater in Coops, 2009; Erdogan, 2009).

Namen in cilj raziskave je na treh testnih primerih ugotoviti vpliv spreminjanja velikosti mrežne celice pri različnih metodah interpolacij na izračunano prostornino. Izbrali smo dve testni območji, na katerih je bil nasut material, in eno testno območje, na katerem je bil opravljen izkop gradbene jame. Glavni merili za izbor sta bili velikost (prostornina in površina) deponije oziroma izkopa (v nadaljevanju: deponije) ter razgibanost površja.

Prostornine računamo kot spremembo količin deponiranega materiala med dvema terminskima izmerama. Zagotoviti moramo, da so podatki obeh terminskih izmer dobro georeferencirani ter da so po kakovosti primerljivi in zadovoljivi za interpoliranje ploskev. V obravnavanih primerih smo izmero opravili s kvadrokopterjem Microdrones MD4-1000. Georeferenciranje smo izvedli na podlagi GNSS-RTK-izmere koordinat signaliziranih oslonilnih točk (Peterman in Mesarič, 2012). Primer oslonilne točke je prikazan na sliki 5a. Obdelavo fotografij za pridobitev oblaka točk in celotno fazo predobdelave oblakov točk za izvedbo interpolacij smo opravili v programu 3DSurvey (<http://www.modriplanet.si>). Oblak točk v bližnjესlikovni fotogrametriji dobimo z metodami večslikovnega ujemanja (Furukawa in Ponce, 2007). Kot primer uporabe takih oblakov točk za izdelavo modelov ploskev terena pri zemeljskih delih naj omenimo Niethammer et al., 2010.

Prostornino računamo z razliko dveh interpoliranih ploskev dveh terminskih izmer istega območja z isto velikostjo mrežnih celic. Z interpolacijo računamo nadmorske višine točk v notranjosti poligona, ki je za obe terminski izmeri isti. Poleg točk pravilne celične mreže vključimo točke na obodu.

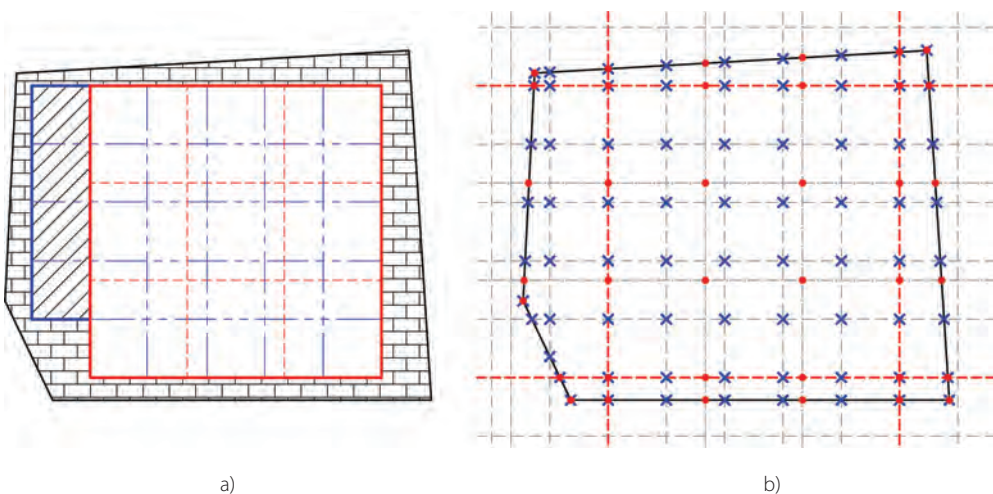
Na podlagi analize rezultatov smo poskušali določiti maksimalno velikost mrežne celice, ki je še primerna za izračun prostornine deponij podobnih velikosti in razgibanosti, kot jih obravnavamo v tej raziskavi. Analizirali smo pet različnih metod interpolacij in deset velikosti mrežnih celic. Za izvedbo interpolacij

smo uporabili program ESRI ArcMap, za izračun prostornin pa lasten program, izdelan v okolju Matlab. Merilo za kakovost rezultatov in referenčni podatek je prostornina deponije, izračunana iz ploskev TIN. Merilo za izbor primerne velikosti mrežne celice je odstopanje izračunane prostornine od prostornine iz ploskev TIN, ki se ne sme razlikovati za več kot 5 % (Kraus, 2000; Mueller et al., 2001).

2 METODOLOGIJA

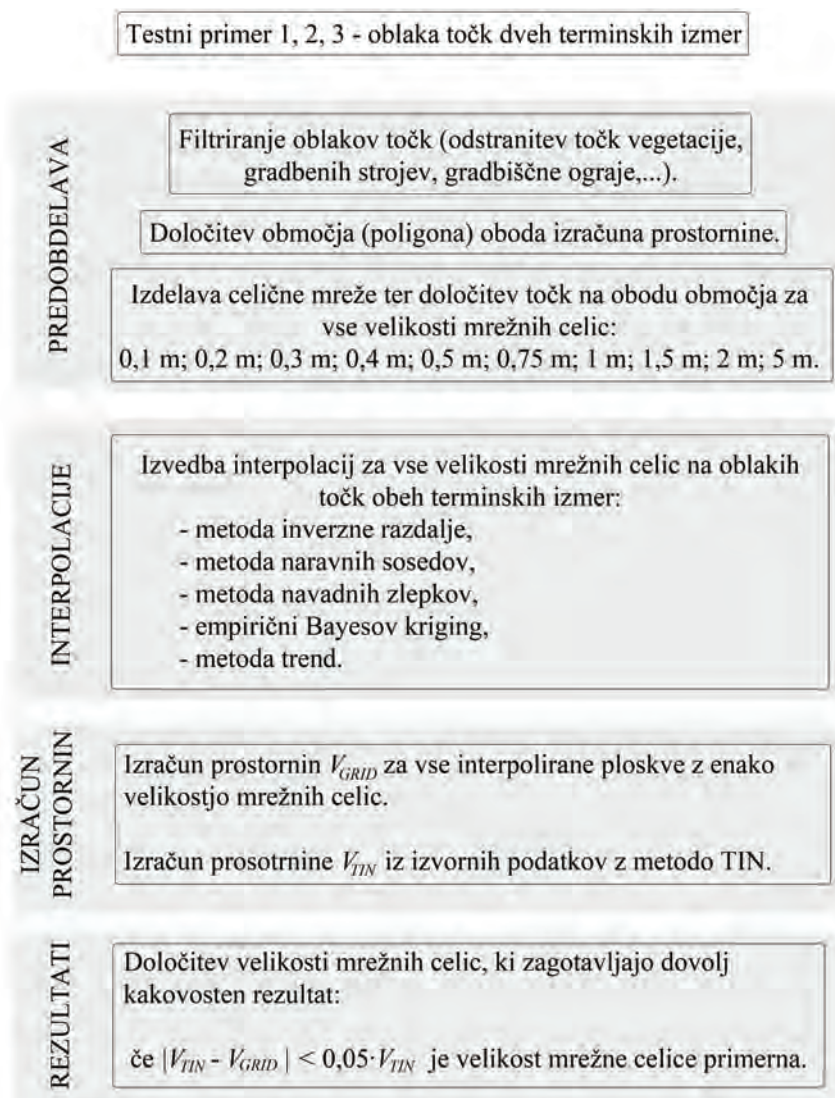
Za analizo vpliva velikosti mrežne celice na izračunano prostornino pri izbranih interpolacijskih metodah smo izbrali tri testna območja oziroma deponije, in sicer dve deponiji gradbenega materiala ter eno gradbeno jamo. Pri večjih deponijah kakovostne podatke najlažje zagotovimo z laserskim skeniranjem (aero ali terestričnim) ali fotografiranjem z UAV. Obdelava posnetkov, izdelava oblaka točk z metodo večslikovnega ujemanja in georeferenciranje oblaka točk so bili opravljeni s programom 3Dsurvey. Za izračun prostornin je pomembno, da imata oblaka točk, med katerima računamo prostornino, enak geodetski datum.

Analiza vpliva velikosti mrežne celice na izračunano prostornino je mogoča le, če pri izračunih obravnavamo identično območje. V večini programskih orodij se pri izračunu prostornin upošteva le območje, ki ga definirajo cele mrežne celice, obrobna območja pa ne. Na sliki 1a so z različnimi šrafurama prikazana neupoštevana območja pri izračunu prostornin za naključno območje izračuna prostornin in dve poljubni velikosti mrežnih celic. Kadar upoštevamo le točke celične mreže, imamo pri različnih velikostih celic različne površine ter oblike oboda območja izračuna. Zaradi izbranih velikosti mrežnih celic (0,1 m, 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m, 0,75 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m in 5,0 m) ter nepravokotne oblike zunanjega roba oziroma oboda območja izračuna prostornine smo v našem primeru za izračun prostornin poleg osnovnih točk celične mreže upoštevali tudi točke na preseku osi celične mreže s poligonom oboda območja (slika 1b). Shematski prikaz izbora točk pred izvedbo interpolacij za dve velikosti mrežnih celic je podan v primeru na sliki 1b. Kjer se križec in pika prekrivata, imamo identične točke v obeh interpoliranih ploskvah. Odebeljene črtkane linije celične mreže označujejo sovpadajoče linije dveh celičnih mrež z različno velikostjo celice.



Slika 1: a) prikaz neupoštevanih območij pri izračunu prostornin z metodo mrežnih celic; b) prikaz določitve točk celične mreže skupaj s točkami na obodu območja.

Za vse naštete velikosti mrežnih celic smo testirali pet interpolacijskih metod. Prostornino računamo med ploskvama dveh terminskih izmer istega območja za posamezno velikost mrežne celice in metodo interpolacije. Referenčni podatek je prostornina, izračunana na podlagi ploskev TIN, ki jih tvorijo vse točke izvornega oblaka točk. Potek od priprave vhodnih podatkov do izračuna prostornin je prikazan v shemi na sliki 2.



Slika 2: Shematski prikaz poteka raziskave.

Merilo za izbor primerne velikosti mrežne celice pri posameznih metodah interpolacij je razlika med izračunanimi prostorninami iz ploskev TIN in celične mreže. Kraus (2000) je analiziral natančnost določitve prostornin na podlagi digitalnih modelov reliefa. Na podlagi opravljenih analiz lahko predpostavimo, da je za posamezno metodo velikost mrežne celice za izračun prostornine še primerna, če

se prostornini iz ploskev TIN V_{TIN} in celične mreže V_{GRID} razlikujeta za manj kot 5 % (Kraus, 2000, Mueller et al., 2001):

$$|V_{TIN} - V_{GRID}| < 0,05 \times V_{TIN} \rightarrow \text{velikost mrežne celice je primerna.}$$

3 TEORETIČNE PODLAGE IN UPORABLJENE METODE

3.1 Uporabljene interpolacijske metode

V splošnem interpolacije uporabljamo za zagotovitev zvezne ploskve iz diskretnih točkovnih podatkov. Pri večini interpolacijskih metod se upošteva, da sta podobnost nadmorskih višin in s tem vpliv na interpolirano vrednost večja med bližnjimi točkami. V raziskavi smo za vseh deset vnaprej pripravljenih celičnih mrež v programu ESRI ArcMap z interpolacijami izračunali nadmorske višine. Uporabili smo naslednje metode interpolacije:

- metodo inverzne razdalje – IDW (angl. Inverse Distance Weighted) (Hessl et. al., 2007);
- metodo naravnih sosedov – NN (angl. Natural Neighbor) (Sibson, 1981);
- metodo navadnih zlepkov – RS (angl. Regularized Spline) (Mitašova in Mitaš, 1993);
- empirični Bayesov kriging – EBK (angl. Empirical Bayesian Kriging) (Pilz in Spöck, 2007);
- metodo trend (angl. Trend Analysis) (URL 1).

Obstajajo številne delitve metod interpolacij. Med uporabljenimi metodami so štiri deterministične (IDW, NN, RS in trend) in ena geostatistična (EBK). Metode interpolacij lahko delimo tudi na lokalne (IDW, NN, RS, EBK) in globalne (trend). O posameznih metodah interpolacij in njihovi delitvi lahko več najdemo v številnih virih, na primer Mitaš in Mitašova, 1999; Johnston et al., 2001; Šumrada, 2005; Grahor, 2014.

3.2 Izračun prostornin

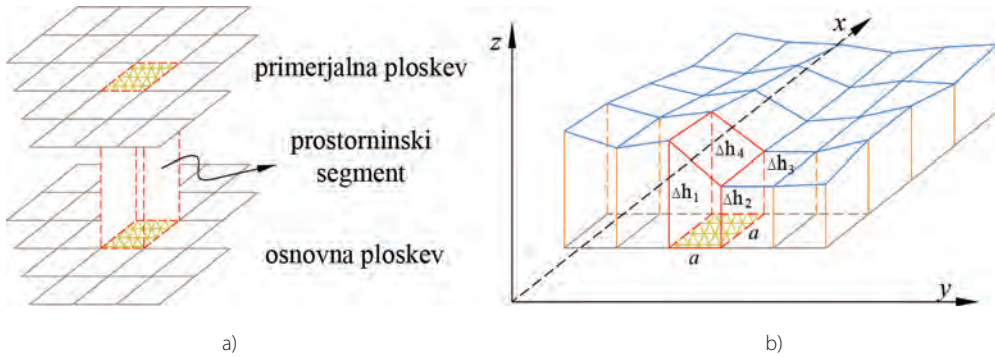
Za izdelavo obračuna zemeljskih del pri gradnji objektov si običajno pomagamo z izračunom prostornine nasipa ali izkopa med dvema terminskima izmerama. Izbor metode izračuna prostornine zemeljskih mas je odvisen od velikosti in vrste objekta, razgibanosti terena in zahtevane natančnosti. Za izračun prostornin so bile z upoštevanjem naštetih vplivov razvite različne metode (Kraus, 2000; Mueller et al., 2001; Schofield in Breach, 2007). Ob upoštevanju delitve objektov na linijske in ploskovne običajno računamo prostornine z naslednjimi metodami:

- metodo prečnih profilov: izračun prostornine temelji na površinah zaporednih prečnih profilov. Osnovno telo je običajno prizmatoid, pri izračunu pa uporabimo Simpsonovo enačbo (Schofield in Breach, 2007);
- metodo površin plastnic: izračun je podoben kot pri metodi prečnih profilov. Površino osnovne ploskve tvori ravnina, ki je omejena oziroma jo dobimo kot presek terena s plastnico, razdaljo med profili pa predstavlja višinski interval;
- metodo primerjave dveh ploskev: osnovno ploskev definirajo mrežne celice ali mreža TIN. Od oblike osnovne ploskve je odvisen tudi izračun. Prostornino izračunamo kot vsoto delnih prostornin posameznih celic oziroma večstranih prizem.

V tej raziskavi smo za izračun prostornin uporabili metodo primerjave dveh ploskev.

3.2.1 Izračun prostornin iz višin, podanih v obliki mrežnih celic

Prostornino določamo na podlagi osnovne in primerjalne ploskve, kjer za vsako mrežno celico primerjamo višine na obeh ploskvah. Mrežni celici na obeh ploskvah povežemo v prostorninski segment, ki je najpogosteje štiristrana prizma (slika 3a). Prostornino določimo kot vsoto delnih prostornin posameznih prostorninskih segmentov.



Slika 3: a) prostorninski segment pri celični mreži; b) primer mreže prostorninskih segmentov.

Delno prostornino i -te štiristrane prizme izračunamo po enačbi (1) (Kraus, 2000; Breznikar in Koler, 2009; slika 3b):

$$V_i = P \cdot \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4}{4}, \quad (1)$$

kjer je $P = a^2$ površina osnovne ploskve prizme, $\Delta h_1, \dots, \Delta h_4$ pa so višinske razlike med osnovno in primerjalno ploskvijo v vseh štirih vogalih mrežne celice. Delno prostornino izračunamo tudi za ostale večstrane prizme, ki jih dobimo na robovih območja, če obod območja ne poteka ravno vzdolž mrežnih točk. V tem primeru osnovno ploskev P predstavljajo tri- ali večstrani liki (sliki 1b in 4a) in jim površino določimo podobno kot pri mreži TIN (glej poglavje 3.2.2.).

Skupno prostornino določimo kot vsoto $i = 1, \dots, n$ delnih prostornin:

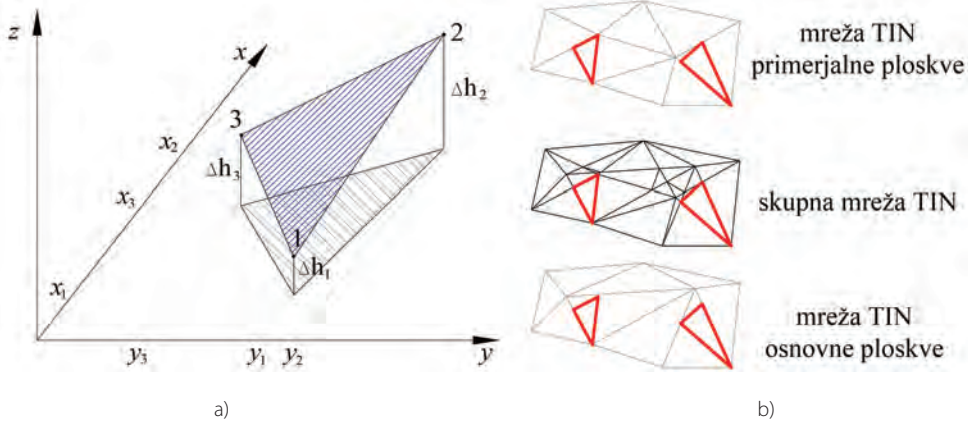
$$V = \sum_{i=1}^n V_i.$$

3.2.2 Izračun prostornin iz podatkov v mreži TIN

Za upodobitev ploskev, interpoliranih iz oblakov točk, se najpogosteje uporabljajo ploskve, izdelane na podlagi mreže TIN. Metoda je primerna zaradi podrobnosti opisa ploskve, saj pri tvorjenju mreže TIN ne izvedemo nobene interpolacije, izdelana ploskev pa vključuje vse točke v oblaku. Ravno zato je ta način kreiranja ploskev primeren tudi za potrebe določevanja prostornin. Postopek izračuna prostornin na podlagi mreže TIN je zelo podoben kot pri mrežnih celicah. Delne prostornine predstavljajo tristrane prizme. Ker ima vsak trikotnik drugačno površino osnovne ploskve P , jo izračunamo iz koordinat vseh treh oglišč posameznega trikotnika (Mueller et al., 2001; slika 4a):

$$P_j = \frac{1}{3} \left[x_{j1} \cdot (y_{j2} - y_{j3}) + x_{j2} \cdot (y_{j3} - y_{j1}) + x_{j3} \cdot (y_{j1} - y_{j2}) \right], \quad (3)$$

kjer so P_j površina trikotnika osnovne ploskve ter (y_{j1}, x_{j1}) , (y_{j2}, x_{j2}) in (y_{j3}, x_{j3}) položajne koordinate vseh treh oglišč v j -tem trikotniku ($j = 1, \dots, m$).



Slika 4: a) določitev površine trikotnika pri računu prostornin z metodo mreže TIN; b) primer izdelave skupne mreže TIN pri računu prostornin iz dveh ploskev mreže TIN.

Delno prostornino izračunamo z enačbo (Mueller et al., 2001; Breznikar in Koler, 2009):

$$V_j = P_j \cdot \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3}{3}, \tag{4}$$

kjer so Δh_1 , Δh_2 in Δh_3 višinske razlike med osnovno in primerjalno ploskvijo v posameznem oglišču trikotnika. Končno prostornino izračunamo kot vsoto delnih prostornin:

$$V = \sum_{j=1}^m V_j. \tag{5}$$

Opozoriti velja, da razporeditev trikotnikov v obeh ploskvah ni enaka. Pri tvorjenju tristranih prizem na podlagi ene ploskve se pri preseku z drugo dodajo nove povezave za nove trikotnike (slika 4b). Rezultat so številni manjši trikotniki oziroma tristrane prizme, iz katerih izračunamo delne prostornine (slika 4a).

Na sliki 4b sta z odebeljenimi črtami izrisana trikotnika, ki prikazujeta dva primera trikotnikov strukture nove mreže TIN. Pri geodetskih izmerah, kjer je končni rezultat enakomerno gost oblak točk, ta metoda zagotavlja zelo natančen izračun prostornine med dvema ploskvama.

4 IZVEDBA MERITEV, PRIPRAVA IN OBDELAVA PODATKOV

Testni podatki oziroma oblaki točk so rezultat obdelave fotografij, posnetih z UAV Microdrone MD4-1000 (slika 5b), ki ima nameščen digitalni fotoaparatus Olympus Pen EP-1. Fotoaparatus ima tipalo veliko 18 mm x 13,5 mm, sestavljeno iz 12,3 milijona točk, in fiksni objektiv z goriščno razdaljo 17 mm.

Georeferenciranje oblakov točk je bilo v vseh treh testnih primerih v vseh terminskih izmerah izvedeno s stabilizacijo in izmero enakih oslonilnih točk (slika 5a). Koordinate oslonilnih točk so bile določene z aritmetično sredino trikratnih 10-sekundnih neodvisnih meritev z metodo GNSS-RTK v razmiku približno 30 minut.



a)

b)

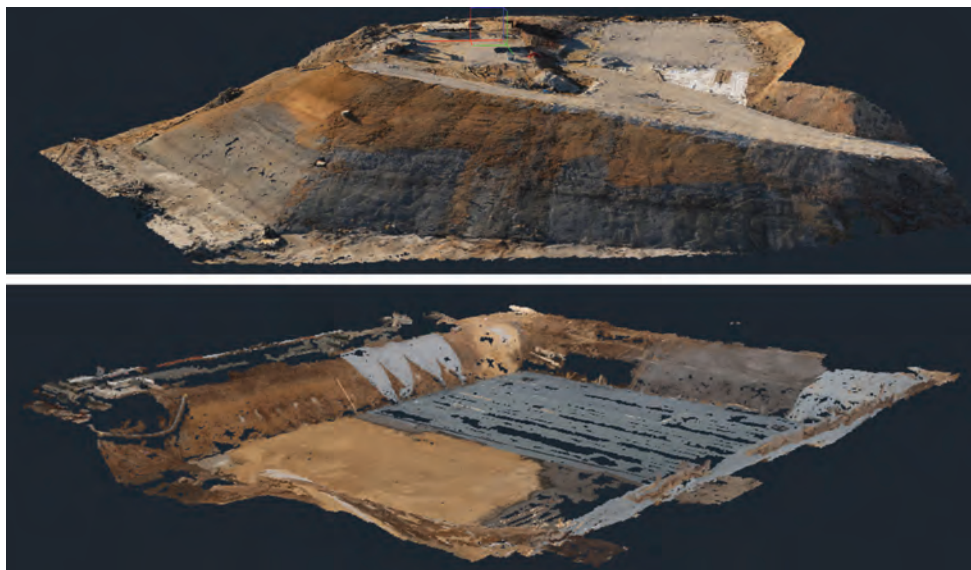
Slika 5: a) primer tarče oslonilne točke (foto: Marko Mesarič); b) Microdrone MD4-1000 podjetja Modri planet (foto: Alenka Pajtler).

Fotografiranje z UAV so bila opravljena pod enakimi snemalnimi pogoji. Tako so bili pri vseh snemanjih za obe terminski izmeri enaki trajektoriji leta, število posnetih fotografij ter prostorska ločljivost fotografij 2 centimetra. Podatki o fotografiranju in velikosti deponij so zbrani v preglednici 1.

Preglednica 1: Podatki o izvedbi snemanj in velikosti testnih območij.

	Testni primer		
	1	2	3
Višina leta	80 m	80 m	80 m
Število vseh fotografij	46	37	26
Število oslonilnih točk	12	9	9
Odstopanja na oslonilnih točkah pri orientaciji fotografij	± 2–3 cm	± 2–3 cm	± 2–3 cm
Prostorska ločljivost fotografij	2 cm	2 cm	2 cm
Število točk v oblaku točk: 1. izmera/2. izmera	3.811.427 / 3.958.313	1.042.298 / 1.251.364	1.522.311 / 1.460.231
Površina območja [m ²]	12.724	7.933	3.264
Prostornina deponije, izračunana iz mreže TIN [m ³]	44.712	9.798	8.622
Čas med terminskima izmerama	1 leto	2 meseca	3 mesece
Vizualna ocena razgibanosti površja	srednja	srednja	nerazgibano – pravilne geometrijske oblike

Deponija testnega primera 1 je veliko večja od preostalih dveh, ki imata skoraj enako prostornino, se pa razlikujeta po razgibanosti površine (preglednica 1 in slika 6).



Slika 6: Prikaz oblakov točk druge terminske izmere testnih primerov 2 in 3.

V programu 3DSurvey smo izvedli ročno filtriranje oblaka točk, ki smo ga kasneje uporabili za interpoliranje ploskev in izračune prostornin. V fazi filtriranja smo morali odstraniti točke visoke in srednje visoke vegetacije, točke gradbiščne ograje ter na primer v oblaku točk testnega primera 1 tudi točke, ki so predstavljale stoječ gradbeni stroj.

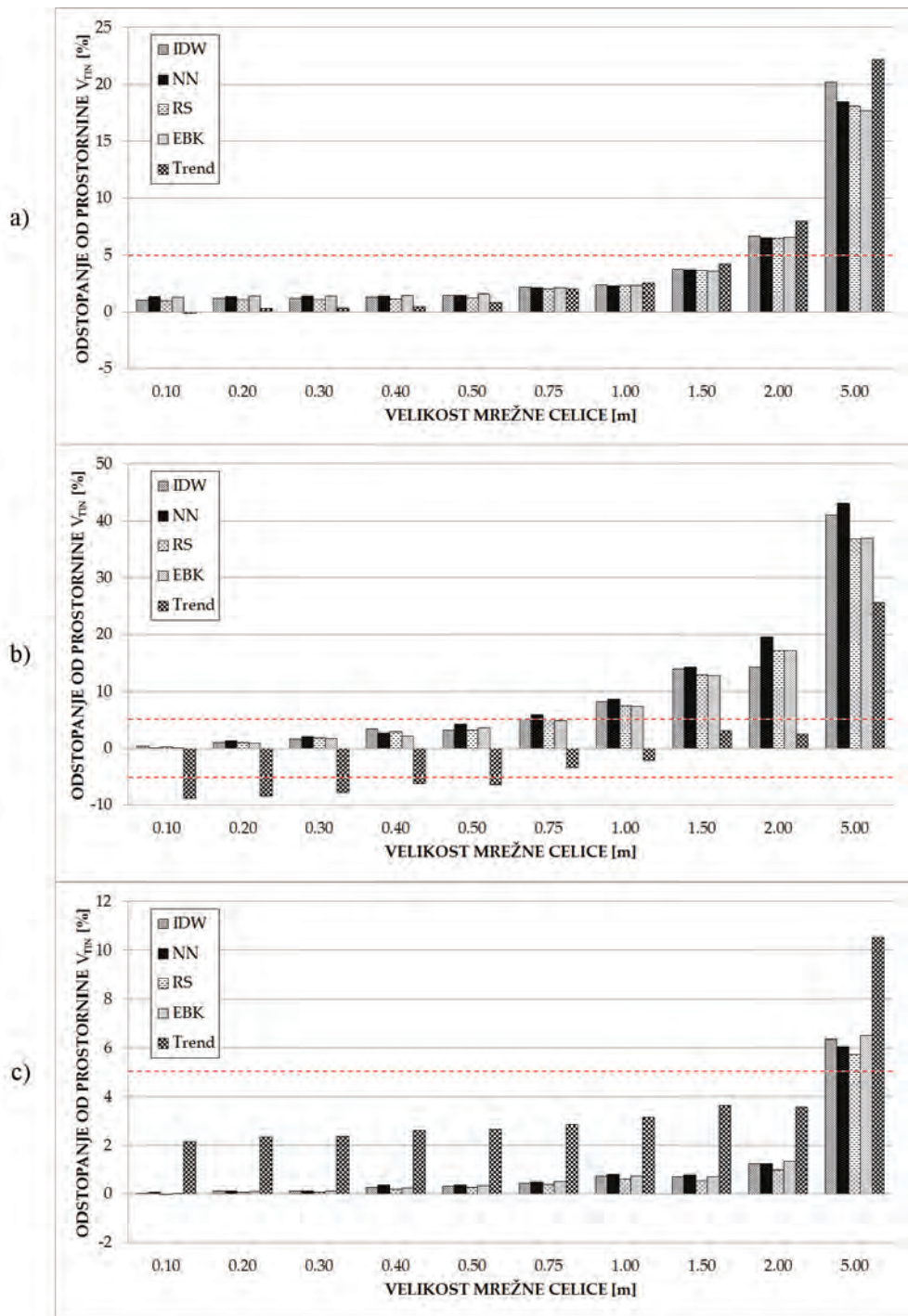
Za posamezno testno območje smo pripravili koordinate položajev točk celične mreže, vključno s točkami na obodu območja (slika 1b). Ti podatki so bili poleg obdelanih oblakov točk vhodni podatki za izvedbo interpolacij v programu ESRI ArcMap. Za vsako testno območje smo obravnavali oblaka točk dveh terminskih izmer, deset velikosti pravih mrežnih celic in pet različnih interpolacijskih metod. Skupaj smo za vsako od treh testnih območij pridobili sto interpoliranih ploskev (po 50 za vsako terminsko izmero). Pri obdelavi vseh podnizov testnih primerov smo v programu ESRI ArcMap za posamezno interpolacijsko metodo uporabili naslednje nastavitve:

- IDW: *Power* = 2, *Search radius* = variabilni, *Number of points* = 12;
- NN: ni treba nastaviti nobenih parametrov;
- RS: *Search neighborhood* = standard, *Maximum neighbors* = 15, *Minimum neighbors* = 10;
- EBK: *Maximum number of points of each local model* = 100, *Local model area overlap factor* = 1, *Number of simulated semivariograms* = 100, *Search neighborhood* = standard circular, *Maximum neighbors* = 15, *Minimum neighbors* = 10;
- Trend: *Polynomial order* = 2, *Type of regression* = linearna regresija.

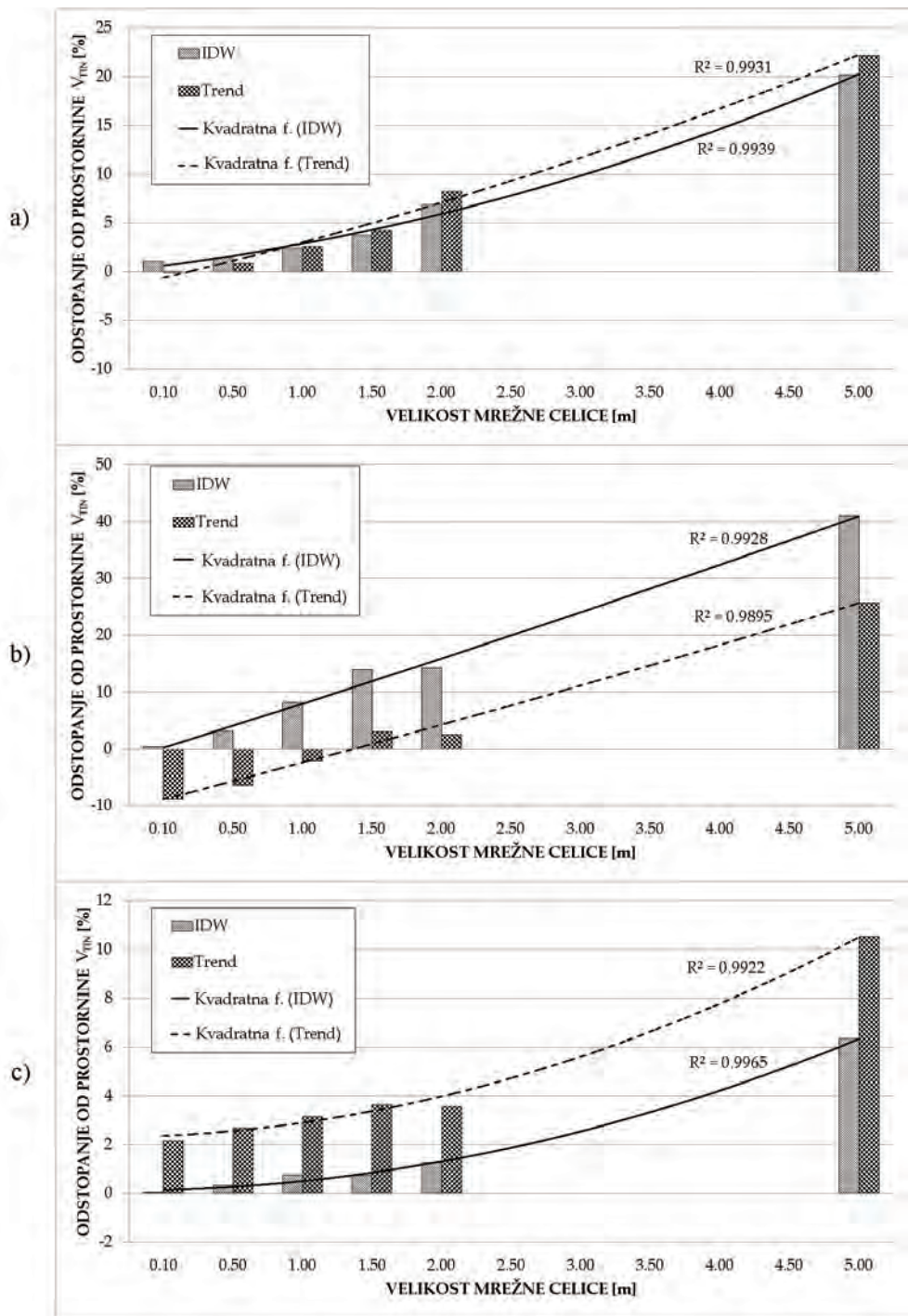
Sledil je izračun prostornin (glej poglavji 3.2.1 in 3.2.2), ki smo jih izračunali z odštevanjem ploskev prve in druge terminske izmere.

5 REZULTATI IN NJIHOVA ANALIZA

Z obdelavo podatkov in izračunom prostornin smo dobili rezultate za posamezno velikost mrežne celice za vse uporabljene metode interpolacij. Rezultate za vse testne primere prikazujemo z grafi na sliki 7. Prikazana so odstopanja v odstotkih od referenčne prostornine, izračunane iz ploskev TIN.



Slika 7: Odstopanja prostornin od prostornine TIN za vse kombinacije velikosti mrežnih celic in metod interpolacij: a) testni primer 1, b) testni primer 2 in c) testni primer 3.



Slika 8: Odvisnost prostornine glede na velikost mrežne celice za metodi IDW in trend: a) testni primer 1, b) testni primer 2 in c) testni primer 3.

Rezultati izračuna prostornin za testni primer 1 pokažejo, da se kot še dovoljena velikost mrežne celice (odstopanje prostornin od referenčne za manj kot 5 %) lahko uporabi velikost 1,5 metra. Za tako velike deponije (približno 50.000 m³) 5 % pomeni kar 2.500 m³. Napaka v praksi pri izračunu v tem primeru je gotovo prevelika. Dovoljeno mejo bi bilo v tem primeru smiselno zmanjšati. Če bi dovoljena meja znašala 2 %, kar pomeni približno 1.000 m³, se dovoljena velikost mrežne celice zmanjša na 0,5 metra. Testni primer 2, ki je po prostornini približno petkrat manjši od testnega primera 1, ponudi drugačne rezultate (slika 7b). Kot smo tudi pričakovali, od rezultatov najbolj odstopajo razlike prostornin za metodo trend, saj je to globalna interpolacijska metoda. Vidimo, da je razlika prostornin V_{TIN} in V_{GRID} za metodo trend pri majhnih velikostih mrežnih celic celo nasprotno predznačena glede na ostale interpolacijske metode. Meje razlike prostornin 5 %, kar v tem primeru znaša slabih 500 m³, ne presežemo z velikostjo mrežne celice 0,5 metra. S slike 7 lahko vidimo, da se razlike prostornin v testnem primeru 2 glede na preostala testna primera z večanjem mrežne celice povečujejo veliko hitreje in skoraj linearno.

Povsem drugačne rezultate smo pričakovali pri obravnavi testnega primera 3, saj gre za izkop gradbene jame skoraj pravilne geometrijske oblike. Pričakovanja potrjujejo rezultati na sliki 7c. V primerjavi s predhodnima primeroma tokrat velikost mrežne celice zelo malo vpliva na izračunano prostornino. Tudi v tem primeru pričakovano odstopajo rezultati izračuna prostornin iz ploskev interpolacije z metodo trend. Na sliki 7c vidimo, da so razlike odstopanj prostornin večje od 5 % le za velikost mrežne celice 5 metrov oziroma da je celo pri velikosti mrežne celice 2 metra razlika prostornin manjša od 1,5 %.

Na podlagi rezultatov na sliki 7 smo v nadaljevanju določili krivuljo, ki se najbolje prilega rezultatom (slika 8). Odstopanja med razlikami prostornin za metode interpolacij IDW, NN, RS in EBK so zelo majhna, zato smo v tej analizi obravnavali le rezultate za metodo IDW ter za metodo trend, ki izraziteje odstopajo od rezultatov drugih interpolacijskih metod. Za določitev kakovosti prileganja krivulje smo uporabili vrednost R – kvadrat oziroma R² (Glantz in Slinker, 2001). Kadar se krivulja dobro prilega podatkom, zavzame vrednosti blizu 1, v nasprotnem primeru pa se približuje 0.

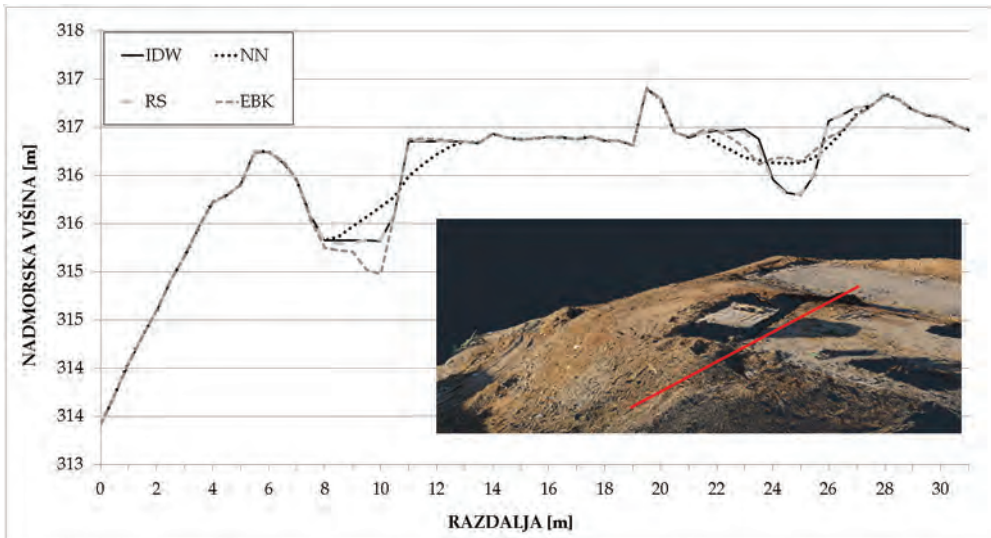
Preglednica 2: Vrednosti R² za interplacijski metodi IDW ter trend in v primerih linearne in kvadratne funkcije.

	Testni primer 1		Testni primer 2		Testni primer 3	
	IDW	trend	IDW	trend	IDW	trend
Linearna funkcija	0,9720	0,9878	0,9928	0,9895	0,9425	0,9413
Kvadratna funkcija	0,9931	0,9939	0,9928	0,9895	0,9922	0,9965

V preglednici 2 vidimo, da v vseh primerih vpliv velikosti mrežne celice na izračunano prostornino v najboljšem približku opisuje kvadratna funkcija in da se za obe metodi interpolacij pri testnem primeru 2 enako kakovostno prilega tudi linearna funkcija. Največja razlika med vrednostma R² za linearno in kvadratno funkcijo je pri testnem primeru 3.

Vpliv različnih metod interpolacij na oblikovanje ploskve za izračun prostornin lahko enostavno prikažemo z izrisom prereza ploskev oziroma izrisom profila. Na sliki 9 vidimo vpliv izbora interpolacije na profil in posledično na izračunano ploskev za izračun prostornine pri velikosti mrežne celice 0,5 metra za testni primer 2. Profil za metodo trend ni prikazan, ker zaradi lastnosti globalne interpolacijske metode trend ta interpolirana ploskev močno odstopa od ploskev preostalih interpolacijskih metod. Na prikazanem območju profila zavzema vrednosti nadmorskih višin od 310,45 metra pri razdalji profila 0,0 metra do

314,02 metra pri razdalji 31,5 metra, vmes pa poteka skoraj linearno. Na posameznih odsekih izrisanih profilov se nadmorske višine točk ploskev razlikujejo tudi do 0,5 metra.



Slika 9: Izris prečnih profilov za interpolirane ploskve z velikostjo mrežne celice 0,5 metra za testni primer 2.

6 SKLEP

Enolično določen zunanji obod območja omogoča ustrezno analizo vpliva izbrane interpolacijske metode in velikosti mrežne celice na izračunano prostornino, saj smo za posamezni testni primer vedno obravnavali identično območje. Poleg oblakov točk, pridobljenih z obdelavo fotografij v programu 3DSurvey, smo kot vhodni podatek pripravili celične mreže, vključno s točkami na obodu območja za vseh deset uporabljenih velikosti mrežnih celic. Na podlagi pripravljenih celičnih mrež smo v programu ESRI ArcMap za vse velikosti mrežnih celic in vse oblake točk izvedli interpolacije ploskev za vseh pet izbranih interpolacij (IDW, NN, RS, EBK in trend). Skupaj smo za izračune prostornin pripravili kar 300 interpoliranih ploskev. Prostornine smo tako za metodo mrežnih celic, z dodatnim upoštevanjem in vključitvijo večstranih prizmatoidov na robu območja, kot tudi za prostornine iz ploskev TIN, izračunali v programu Matlab.

Iz dobljenih prikazov rezultatov na slikah 7 in 8 ter vrednosti R^2 v preglednici 2 vidimo, da razlike izračunanih prostornin v vseh primerih kvadratno naraščajo z večanjem velikosti mrežne celice. Največja razlika med vrednostma R^2 za linearno in kvadratno funkcijo je pri geometrijsko oblikovanem testnem primeru 3. Pri testnem primeru 1 je razlika nekoliko manjša. Posebnost pa je testni primer 2, kjer je prileganje linearne in kvadratne funkcije enako kakovostno oziroma razlike med vrednostma R^2 ni. Iz rezultatov obravnavanih testnih primerov lahko ugotovimo, da se vpliv velikosti mrežne celice na razliko prostornin med V_{TIN} in V_{GRID} spreminja s kvadratno funkcijo. Sklepamo, da na različno velikost razlik med vrednostma R^2 vplivata ravno merili (velikost in razgibanost), ki smo ju upoštevali pri izboru testnih primerov. Med velikostjo deponije in njeno razgibanostjo ima gotovo veliko večji vpliv razgibanost površja. V testnem primeru 3, kjer je deponija prave geometrijske oblike oziroma je enostavno matematično

opisljiva, dobimo pri postavljeni meji odstopanja 5 % zadovoljive rezultate za skoraj vse interpolacijske metode, razen za metodo trend, ki je globalna metoda, tudi pri velikosti mrežne celice 2 metra.

V praksi je dogovorjena mejna razlika prostornin 5 % prešibko merilo. V testnem primeru 1 5 % razlike v prostornini pomeni kar 2.500 m³ nasutega materiala, v ostalih dveh pa nekaj manj kot 500 m³. Če merilo dovoljene razlike prostornin, izračunanih iz pravilnih celičnih mrež in mreže TIN, zmanjšamo na 2 %, se največja še dovoljena velikost mrežne celice skoraj v vseh primerih zmanjša za faktor 3 (preglednica 3).

Preglednica 3: Maksimalne velikosti mrežnih celic, ki še zagotavljajo odstopanje prostornin do 5 % oziroma do 2 % od V_{TIN}

	Testni primer 1	Testni primer 2	Testni primer 3
$ V_{TIN} - V_{GRID} < 0,05 \cdot V_{TIN}$	1,5 m	0,75 m	5 m
$ V_{TIN} - V_{GRID} < 0,02 \cdot V_{TIN}$	0,5 m	0,2 m	1,5 m

Ugotovimo lahko, da so vse uporabljene metode interpolacij razen globalne metode trend, primerne za izračun prostornin deponij in izkopov gradbenih jam. Zaradi zmogljivejše strojne opreme, ki omogoča hitrejšo obdelavo večjih količin podatkov, in bolj izpopolnjene programske opreme je smiselno pri izračunih prostornin z metodo mrežnih celic uporabljati velikost mrežne celice do nekaj deset centimetrov.

ZAHVALA

Avtorji se za izvedbo snemanj, obdelavo podatkov in možnost uporabe programa 3DSurvey zahvaljujemo podjetju Modri planet. Hvala tudi recenzentoma za prispevek h kakovosti objave!

Literatura in viri:

- Bater, C. W., Coops, N. C. (2009). Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation. *Computers & Geosciences*, 35(2), 289–300. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2008.09.001>
- Bielecka, E., Bober, A. (2013). Reliability analysis of interpolation methods in travel time maps – the case study of Warsaw. *Geodetski vestnik*, 57(2), 299–312. DOI: <http://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2013.02.299-312>
- Breznikar, A., Koler, B. (2009). Inženirska geodezija – gradivo za izvedbo strokovnega dela izpita iz geodetske stroke. <http://www.izs.si/strokovni-izpiti/po-zakonu-o-geodetski-dejavnosti-geodetska-stroka/izpitni-program>, pridobljeno 5. 2. 2015.
- Erdogan, S. (2009). A comparison of interpolation methods for producing digital elevation models at the field scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(3), 366–376. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1731>
- Furukawa, Y., Ponce, J. (2007). Accurate, Dense and Robust Multi-View Stereopsis. V: *Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. CVPR, 07. IEEE*, 1–8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2007.383246>
- Garnero, G., Godone, D. (2013). Comparisons between different interpolation techniques. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W3, 139–144. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W3-139-2013>
- Glantz, S. A., Slinker, B. K. (2001). *Primer of Applied Regression and Analysis of Variance*, 2nd edition. New York [etc.]: McGraw-Hill.
- Grahor, V. (2014). *Primerjava prostornin na osnovi podatkov zajema z letalniki*. Diplomsko delo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 64 str.
- Gumus, K., Sen, A. (2013). Comparison of spatial interpolation methods and multi-layer neural networks for different point distributions on a digital elevation model. *Geodetski vestnik*, 57(3), 523–543. DOI: <http://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2013.03.523-543>
- Hessl, A., Miller, J., Kernan, J., Keenum, D., McKenzie, D. (2007). Mapping Paleo-Fire Boundaries from Binary Point Data: Comparing Interpolation Methods. *The professional Geographer*, 59(1), 87–104. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9272.2007.00593.x>
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K., Lucas, N. (2001). *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. Redlands, California: ESRI Press.
- Kraus, K. (2000). Zur Genauigkeit der Volumenbestimmung. *Zeitschrift fuer Vermessungswesen*, 125(12), 398–402.
- Mitaš, L., Mitašova, H. (1999). *Spatial Interpolation*. V: P. Longley, M. F. Goodchild, D. Maguire in D. Rhin (ur.), *Geographical Information Systems*. 2nd Edition. Vol. 1. Principles and Technical Issues, 8, 481–492.
- Mitašova, H., Mitaš, L. (1993). Interpolation by regularized spline with tension: I. Theory and implementation. *Mathematical Geology*, 25(6), 641–655. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00893171>
- Mueller, G., Moeser, M., Schlemmer, H., Werner, H. (2001). *Handbuch Ingenieurgeodäsie – Strassenbau*, 2., voellig neu bearbeitete und erweiterte Auflage (str. 247–249).

Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag.

- Niethammer, U., Rothmund, S., Joswig, M. (2010). UAV-based remote sensing of landslides. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.012>
- Peterman, V., Mesarič, M. (2012). Land survey from unmanned aerial vehicle. XXIII ISPRS Congress 2012. Melbourne, Avstralija.
- Pilz, J., Spöck, G. (2007). Why do we need and how should we implement Bayesian kriging methods. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 22(5),

621–632. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00477-007-0165-7>

- Schofield, W., Breach, M. (2007). Engineering Surveying, 6th edition (str. 457–481). Oxford [etc.]: Butterworth-Heinemann.
- Sibson, R. (1981). A brief description of natural neighbor interpolation. V.V. Barnett (ur.), Interpreting Multivariate Data (str. 21–36), John Wiley.
- Šumrada, R. (2005). Strukture podatkov in prostorske analize (str. 197–239). Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- URL 1: How Trend works. <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/009z0000007n000000, pridobljeno 14. 5. 2015>.

Urbančič T., Grahor V., Koler B. (2015). Vpliv velikosti mrežne celice in metod interpolacij na izračunano prostornino. Geodetski vestnik, 59 (2): 231–245. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2015.02.231-245

asist. Tilen Urbančič, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: tilen.urbancic@fgg.uni-lj.si

doc. dr. Božo Koler, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: bozo.koler@fgg.uni-lj.si

Vid Grahor, univ. dipl. inž. geod.

GEOMASS s.p.
Železnikova ulica 2, SI-2000 Maribor
e-naslov: vid.grahor@gmail.com