

# Odabir optimalne prostorne rezolucije fotogrametrijskih digitalnih modela površine za primjenu u šumarstvu – primjer s područja nizinskih šuma hrasta lužnjaka

Ivan Balenović, Hrvoje Marjanović

## Nacrtak – Abstract

Posljednjih godina digitalna aerofotogrametrija počinje se primjenjivati kao alternativna metoda zračnomu laserskomu skeniranju u trodimenzionalnom modeliranju šumskih površina, poglavito u izradi digitalnih modela površine (DSM-ova). Za potrebe inventure šuma DSM se uglavnom koristi u kombinaciji s digitalnim modelom reljefa, preklapanjem kojih se dobije digitalni model visine sastojina/krošanja (CHM) koji se potom koristi za procjenu različitih varijabli pojedinačnih stabala ili šumskih sastojina.

Glavni je cilj ovoga istraživanja bio ispitati vertikalnu točnost DSM-ova različite prostorne rezolucije na šumskom području. U tu su svrhu za nizinske šume hrasta lužnjaka (GJ Kunjevci, UŠP Vinkovci) izrađeni DSM-ovi prostorne rezolucije 0,3 m ( $DSM_{0,3}$ ), 0,5 m ( $DSM_{0,5}$ ), 1 m ( $DSM_1$ ), 2 m ( $DSM_2$ ) i 5 m ( $DSM_5$ ) metodom slikovne korelacije digitalnih stereo-aerofotogrametriskih slika. Vertikalna točnost DSM-ova ispitana je usporedbom nadmorske visine 294 vrha stabala izmjerena manualnom, stereofotogrametrijskom izmjerom i nadmorske visine očitane s DSM-ova.

Prema očekivanjima najveća je točnost dobivena za  $DSM_{0,3}$  (drugi korijen srednje kvadratne pogreške, RMSE = 0,76 m; srednja pogreška, ME = -0,03 m), ali je gotovo identična točnost dobivena i za  $DSM_{0,5}$  (RMSE = 0,76 m; ME = -0,05 m) i  $DSM_1$  (RMSE = 0,76 m; ME = -0,07 m). Nešto manja točnost dobivena je za  $DSM_2$  (RMSE = 0,84 m; ME = -0,16 m), a najmanja točnost dobivena je za  $DSM_5$  (RMSE = 1,31 m; ME = -0,54 m).

Dobiveni rezultati pokazuju da smanjivanje prostorne rezolucije rasterskih DSM-ova od 0,3 m do 1 m ne utječe bitno na njihovu vertikalnu točnost, odnosno na točnost pri očitavanju nadmorske visine vrhova stabala. Daljnjim smanjivanjem prostorne rezolucije prema 2 m, a osobito do 5 m, vertikalna točnost DSM-ova se smanjuje. Buduća istraživanja vrijedilo bi usmjeriti na ispitivanja mogućnosti primjene DSM-ova različite prostorne rezolucije u inventuri šuma, i to:  $DSM_{0,3}$  i  $DSM_{0,5}$  za pridobivanje informacija na razini pojedinačnih stabala,  $DSM_{0,5}$  i  $DSM_1$  na razini plohe te  $DSM_1$ ,  $DSM_2$  i  $DSM_5$  na razini sastojine.

Ključne riječi: digitalni model površine (DSM), digitalna fotogrametrija, aerofotogrametrija, slikovna korelacija, inventura šuma

## 1. Uvod – Introduction

Digitalni model površine (DSM, prema engl. *Digital Surface Model*) predstavlja matematički model Zemljine površine, uključujući izgrađene objekte i vegetaciju (Paparoditis i Polidori 2002). Ako se radi o DSM-u nekoga šumskoga područja, on predstavlja gornju površinu krošanja. Za izradu DSM-a uglavnom se ko-

riste podaci dobiveni metodama daljinskih istraživanja. Među različitim metodama daljinskih istraživanja posljednjih desetak godina zračno lasersko skeniranje (LiDAR, prema engl. *Light Detection and Ranging*) i digitalna stereofotogrametrija pokazale su se najpouzdanijim metodama izrade DSM-a (Höhle i Höhle 2009). Pri tom su kod LiDAR-a glavni ograničavajući čimbe-

nici visoki troškovi snimanja, osobito kada se radi o većim područjima istraživanja i ponovljenim snimanjima. S druge strane, troškovi aerosnimanja znatno su niži od LiDAR-a te se u mnogim zemljama, uključujući i Hrvatsku, aerosnimke redovito ažuriraju periodičnim aerosnimanjem svakih nekoliko godina za topografske svrhe (Nurminen i dr. 2013). Nedavni napredak i poboljšanje kvalitete aerosnimaka (radiometrijska i geometrijska rezolucija), razvoj naprednih algoritama obrade aerosnimaka, poboljšanje kapaciteta i snage računala (Leberl i dr. 2010) potaknuli su brojna istraživanja o mogućnostima uporabe DSM-a dobivena digitalnom stereofotogrametrijom iz aerosnimaka u mnogim djelatnostima, pa tako i u šumarstvu (Bohlin i dr. 2012, Järnstedt i dr. 2012, Nurminen i dr. 2013, Straub i dr. 2013, Pitt i dr. 2014, Gobakken i dr. 2015, Granholm i dr. 2015, Stepper i dr. 2015, Rahlf i dr. 2015, St-Onge i dr. 2015, Puliti i dr. 2016, Tanhuanpää i dr. 2016).

Postupak izrade DSM-a u digitalnoj fotogrametriji temelji se na principu automatiziranoga stereofotogrametrijskoga procesiranja aerosnimaka. Nazivi koji se upotrebljavaju za opis postupka jesu: slikovna korelacija (engl. *image correlation*), digitalna korelacija aerosnimaka (engl. *correlation of digital images*), odnosno usklađivanje snimaka (engl. *image matching*). Cilj je slikovne korelacije automatsko određivanje slikovnih koordinata korespondirajućih točaka (piksela) lijeve i desne aerosnimke (stereopara) na temelju njihove radiometrijske i geometrijske sličnosti (White i dr. 2013). Ako je korelacija zadovoljavajuća (npr. koeficijent korelacije za promatranu točku lijeve i desne aerosnimke veći od unaprijed postavljenoga donjega praga), točka se uzima u obzir za daljnju obradu (aerotriangulacija, digitalno modeliranje terena itd.). Rezultat je slikovne korelacije trodimenzionalni oblak točaka (engl. *image point cloud*) koji se u daljnjim postupcima (interpolacijom) može koristiti za modeliranje terena, i to ponajprije za izradu DSM-a. DSM dobiven slikovnom korelacijom aerosnimaka vrlo je sličan onomu koji se dobije iz prvoga povratnoga impulsa zračnim laserskim skeniranjem (Pitt i dr. 2014).

U šumarstvu se DSM uglavnom koristi u kombinaciji s digitalnim modelom reljefa (DTM, prema engl. *Digital Terrain Model*) dobivenim iz aerosnimaka fotogrametrijskim putem (npr. u Hrvatskoj fotogrametrijskom izmjerom lomnih linija terena i izmjerom pravokutne mreže visinskih točaka) ili u novije vrijeme iz podataka koje daje LiDAR. Preklapanjem DTM-a i DSM-a, odnosno oduzimanjem DTM-a od odgovarajućega DSM-a dobije se digitalni model visine sastojina ili digitalni model visine krošanja (CHM, prema engl. *Canopy Height Model*) koji se potom u kombinaciji

sa referentnim terenskim podacima može koristiti za procjenu različitih varijabli stabala i šumskih sastojina. Nedavna su istraživanja upozorila na velike mogućnosti za primjenu CHM-a izrađena iz fotogrametrijskoga DSM-a u procjeni glavnih strukturnih elemenata šumskih sastojina (Bohlin i dr. 2012, Järnstedt i dr. 2012, Nurminen i dr. 2013, Straub i dr. 2013, Pitt i dr. 2014, Gobakken i dr. 2015, Granholm i dr. 2015, Stepper i dr. 2015, Rahlf i dr. 2015, St-Onge i dr. 2015, Puliti i dr. 2016, Tanhuanpää i dr. 2016). Pri tom se točnost procijenjenih strukturnih elemenata sastojina razlikuje ovisno o tipu šume i strukturi sastojina u kojima je istraživanje provedeno, o pouzdanosti korištenih modela za procjenu strukturnih elemenata sastojina na temelju podataka dobivenih iz CHM-a te o samoj kvaliteti i točnosti CHM-a, odnosno DTM-a i DSM-a.

Kvaliteta fotogrametrijskoga DSM-a ovisi o korištenom algoritmu odnosno metodi slikovne korelacije, kvaliteti aerosnimaka (npr. geometrijska, radiometrijska, spektralna rezolucija), karakteristikama aerosnimanja (npr. uzdužni/poprečni preklap, vremenski uvjeti, dnevno vrijeme aerosnimanja, kutu upadanja sunčanih zraka itd.) te karakteristikama objekata/vegetacije na aerosnimkama (Baltsavias i dr. 2008, St-Onge i dr. 2008). Budući da je šuma vrlo heterogen sustav, DSM šumskih područja često je slabije kvalitete, odnosno manje točnosti nego DSM nekoga otvorenoga područja (bez objekata i pokrova), s izgrađenim objektima ili travnatom vegetacijom (Hoby i Ginzler 2012, Balenović i dr. 2015, Ginzler i Hoby 2015).

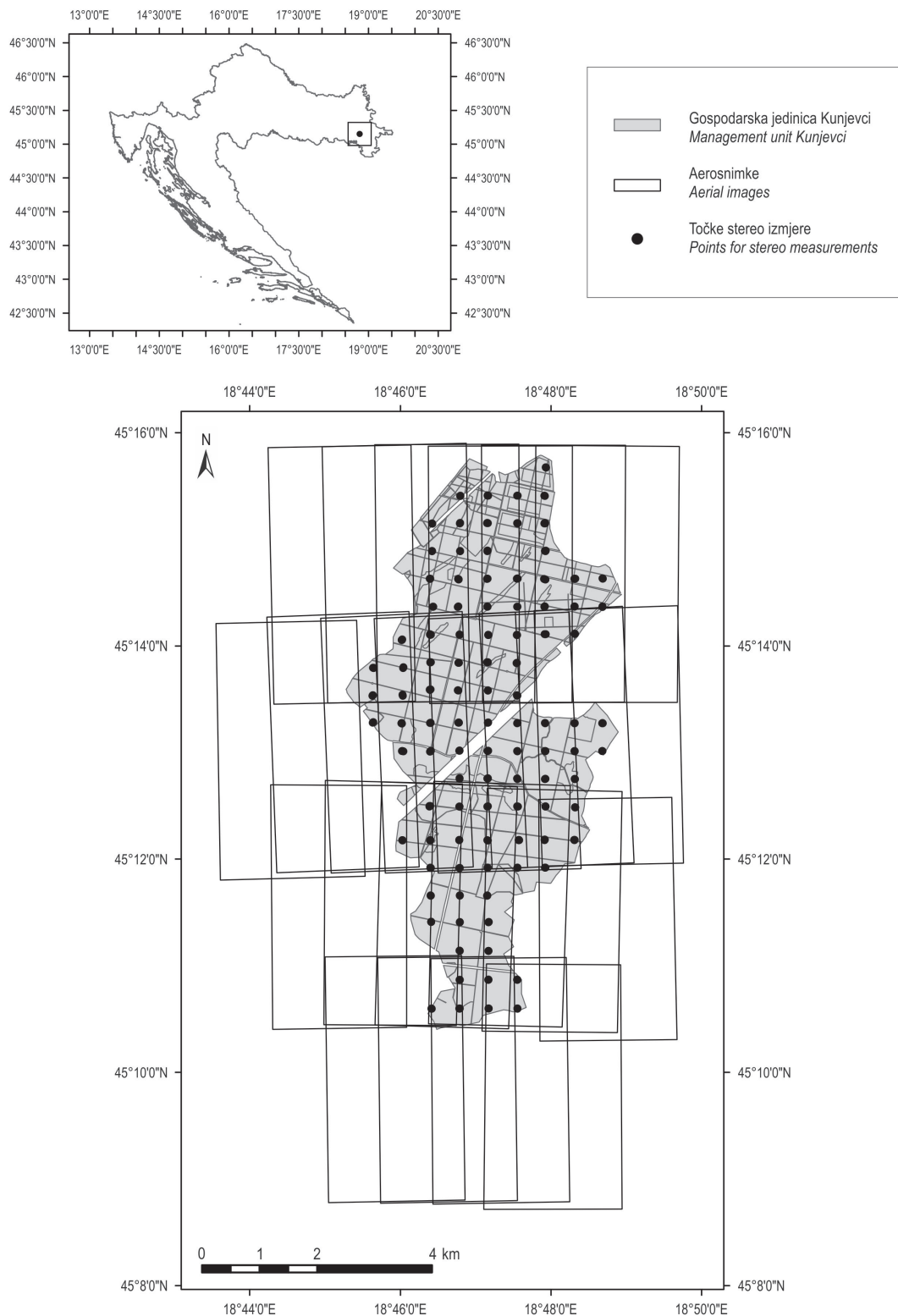
Za izradu DSM-a visoke prostorne rezolucije potrebno je značajno vrijeme procesiranja, osobito ako se radi o većim šumskim površinama. Cijena informatičke infrastrukture (procesorsko vrijeme, diskovni prostor) donedavno je ograničavala značajniju primjenu u šumarstvu. Posljedica toga jest da su detaljnija istraživanja o kvaliteti, odnosno o točnosti DSM-a u šumskim područjima rijetka. Primjerice, nedovoljno je istražen utjecaj prostorne rezolucije fotogrametrijskoga DSM-a na njegovu točnost.

Cilj je ovoga rada ispitati vertikalnu točnost DSM-ova različite prostorne rezolucije na šumskom području radi odabira optimalne rezolucije za primjenu u šumarstvu.

## 2. Materijal i metode – *Materials and methods*

### 2.1 Područje istraživanja – *Study area*

Istraživanje je provedeno u nizinskim šumama hrasta lužnjaka gospodarske jedinice Kunjevci (Uprava šuma Podružnica Vinkovci) smještene u istočnom



**Slika 1.** Položaj gospodarske jedinice Kunjevci (gore, manja slika). Područje istraživanja s prostornim rasporedom (blokovima) aerosnimaka i prostornim rasporedom točaka za manualnu stereofotogrametrijsku izmjeru (dolje)

**Fig. 1** Geographic location of the management unit Kunjevci (upper small image). Study area with the spatial distribution of aerial images and points for manual stereophotogrammetric measurement (bellow)

dijelu Hrvatske, u neposrednoj blizini Vinkovaca. Istraživanjem je obuhvaćeno 70 odsjeka uređajnoga razreda hrasta lužnjaka svih dobnih razreda (I–VII) ukupne površine 1869,33 ha (slika 1). Jednodobne sastojine hrasta lužnjaka na odabranom području uglavnom su mješovite, a u manjoj mjeri čiste. Uz hrast lužnjak (*Quercus robur* L.) od ostalih vrsta drveća u značajnoj mjeri prisutni su obični grab (*Carpinus betulus* L.), poljski jasen (*Fraxinus angustifolia* L.) i američki jasen (*Fraxinus americana* L.), dok se vez (*Ulmus laevis* Pall.), klen (*Acer campestre* L.), divlja trešnja (*Prunus avium* L.), crna joha (*Alnus glutinosa* Gaertn.), lipe (*Tilia* sp.) i domaće topole (*Populus* sp.) pojavljuju sporadično. Sastojine su uglavnom na I., a u manjoj mjeri na II. bonitetu staništa. Strukturna obilježja za 70 odabranih sastojina područja istraživanja po dobnim razredima i ukupno prikazani su u tablici 1. Nadmorska visina odabranoga područja kreće se u rasponu od 79 do 87 m.

## 2.2 Digitalne aerosnimke – *Digital aerial images*

U ovom su istraživanju za izradu DSM-ova korištene digitalne infracrvene kolorne (ICK) aerosnimke

snimljene digitalnom aerofotogrametrijskom kamerom velikoga formata »Intergraph Z/I Imaging Digital Mapping Camera« (DMC) (Hinz i dr. 2001). Aerosnimke su prikupljene tijekom vegetacijskoga razdoblja (srpanj, kolovoz) 2011. godine u okviru regularnoga topografskoga aerosnimanja Republike Hrvatske. Područje istraživanja pokriveno je s ukupno 23 aerosnimke prostorne rezolucije 0,32 m (GSD – prema engl. *Ground Sample Distance*) snimljene u četiri niza s uzdužnim preklapom od 60 % i poprečnim preklapom od 30 % (slika 1). Pomoću tehnologije GPS/IMU korištene tijekom aerosnimanja svakoj snimci zabilježena je precizna pozicija projekcijskoga središta te parametri vanjske orijentacije. Prikupljeni sirovi slikovni podaci potom su naknadno procesirani u postupcima radiometrijske i geometrijske korekcije te spajanja pankromatskih i multispektralnih aerosnimaka (engl. *pan-sharpening*) od izvođača aerosnimanja (Geodetski zavod d.d. Osijek, Hrvatska), a prema specifikaciji proizvoda 301D130 Državne geodetske uprave. Također, provedena je i aerotriangulacija (orijentacija) aerosnimaka koja je ispitana pomoću kontrolnih točaka. Pre-

**Tablica 1.** Srednje vrijednosti i raspon vrijednosti (u zagradama) osnovnih strukturnih elemenata sastojina po dobnim razredima i ukupno za 70 odabranih sastojina prema Osnovi gospodarenja za razdoblje važnosti od 2012. do 2021. godine. Inventura šuma provedena je tijekom 2010. i 2011. te podaci pokazuju stanje na početku 2012. godine

**Table 1** The average values and ranges (in brackets) of basic stand structural parameters of 70 stands grouped in age classes obtained from applicable Forest Management Plan for the period 2012 to 2021. The inventory was conducted during 2010 and 2011, and the data present the situation at the beginning of 2012

Dobni razred Age class	Dob Age	Broj sastojina Number of stands	Površina Area	Srednji promjer Mean dbh	Srednja visina Mean height	Broj stabala Stand density	Temeljnica Basal area	Obujam Volume
	Godine Years	N	ha	cm	cm	Stabla/ha Trees/ha	m <sup>2</sup> /ha	m <sup>3</sup> /ha
I	0–20	9	326,75	–	–	–	–	–
II	21–40	13	447,4	14,8 (12,8–17,3)	16,1 (14,2–17,1)	783 (482–1103)	14,1 (6,4–21,2)	115,1 (49,8–188,3)
III	41–60	5	179,18	18,0 (16,3–19,2)	19,6 (18,9–19,9)	892 (827–969)	22,6 (20,1–26,2)	228,8 (196,1–260,3)
IV	61–80	5	92,7	26,7 (23,9–29,0)	23,6 (22,9–24,6)	461 (389–562)	25,6 (23,8–27,9)	339,6 (311,5–380,8)
V	81–100	12	159,76	30,9 (26,5–42,9)	24,3 (22,1–29,0)	389 (219–532)	28,0 (24,4–31,5)	413,2 (332,0–524,4)
VI	101–120	16	357,33	32,8 (28,2–37,3)	24,5 (21,8–26,5)	350 (244–432)	29,1 (24,9–32,8)	443,4 (377,5–528,2)
VII	121–140	10	306,21	34,0 (30,3–37,8)	24,1 (22,2–27,3)	335 (288–485)	30,1 (27,0–35,1)	475,5 (403,6–571,0)
Ukupno* Total*	–	70	1869,33	27,1 (12,8–42,9)	19,3 (14,2–29,0)	437 (219–1103)	21,8 (6,4–35,1)	302,1 (49,8–571,0)

\* Ukupne vrijednosti iskazane su bez sastojina I. dobnoga razreda – Total values are presented without stands of age class I



ma specifikaciji proizvoda 301D130 horizontalna točnost aerotriangulacije iznosila je  $RMSE_{x,y} < 0,25$  m, a vertikalna  $RMSE_z < 0,30$  m. Zajedno s digitalnim ICK aerosnimkama od Državne geodetske uprave dostavljeni su nam i parametri unutarnje i vanjske orijentacije potrebni za daljnje procesiranje.

### 2.3 Izrada digitalnih modela površine *Generation of digital surface models*

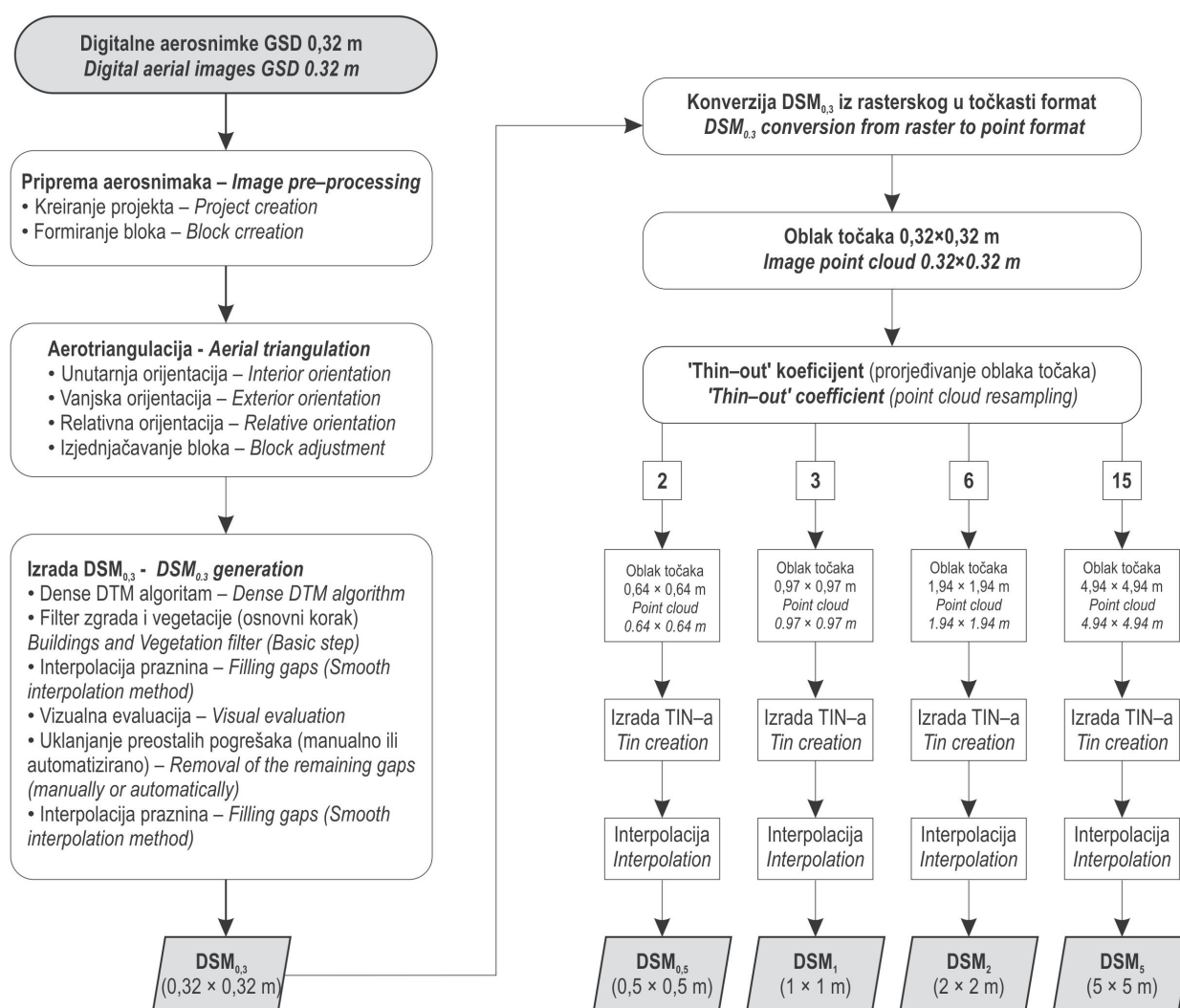
Cjelokupni postupak izrade DSM-a proveden je na digitalnoj fotogrametrijskoj stanici korištenjem digitalnoga fotogrametrijskoga sustava PHOTOMOD 5.24 (Racurs Co., Moskva, Rusija). Konfiguracija hardverskih komponenti digitalne fotogrametrijske stanice prikazana je u radu Balenović i dr. (2015). PHOTOMOD 5.24 je modularni sustav, tj. sastoji se od niza modula koji omogućuju izvođenje raznih fotogrametrijskih postupaka.

Postupak izrade DSM-ova različite prostorne rezolucije shematski je prikazan na slici 2. Prije same izrade DSM-ova provedeni su postupci pripreme i orijentacije (aerotriangulacije) aerosnimaka. Priprema aerosnimaka za fotogrametrijsko procesiranje koja obuhvaća kreiranje projekta (definiranje projekcije, minimalne i maksimalne nadmorske visine područja) i formiranje bloka aerosnimaka (unos i pozicioniranje aerosnimaka) provedena je u modulu PHOTOMOD Core. Zatim je slijedila orijentacija snimaka odnosno aerotriangulacija koja je provedena postupcima unutarnje, vanjske i relativne orijentacije te izjednačenjem bloka aerosnimaka u modulu PHOTOMOD AT. Parametri unutarnje orijentacije kamere korišteni za aerotriangulaciju su: veličina piksela, žarišna duljina kamere, koordinate glavne točke snimke te distorzija objektiva, a dostupni su u kalibracijskom izvješću kamere. Vanjska je orijentacija provedena unosom parametara zabilježenih tijekom aerosnimanja. Parametri vanjske orijentacije su koordinate projekcijskih središta snimaka ( $x, y, z$ ) i kutovi rotacije ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) u trenutku snimanja (ekspozicije). Relativna orijentacija aerosnimaka, odnosno međusobna orijentacija susjednih snimaka bloka provedena je automatskim mjerenjem veznih točaka. Također, kako bi se povećala točnost relativne orijentacije ručno je dodano niz veznih točaka. Naposljetku, izjednačenje bloka aerosnimaka provedeno je metodom zrakovnoga snopa (engl. *bundle block adjustment*) u modulu PHOTOMOD Solver. Ulazni elementi za izjednačenje bile su slikovne koordinate svih veznih točaka, parametri unutarnje i vanjske orijentacije. Rezultati izjednačenja bili su unutar zadanih maksimalnih odstupanja ( $RMSE_{x,y} < 0,25$  m,  $RMSE_z < 0,3$  m).

DSM-ovi su izrađeni prema metodologiji opisanoj u radu Balenović i dr. (2015). Ukratko, prije same iz-

rade definirano je područje za izradu DSM-a koje mora biti unutar preklopa aerosnimaka. Za izradu DSM-a korišten je algoritam Dense DTM u modulu PHOTOMOD DTM. Dense DTM je algoritam slikovne korelacije temeljene na plošnim podacima koji radi tako da primjenom unakrsne korelacije (engl. *cross-correlation*) računa koordinate korespondentnih piksela svih točaka u području preklopa dviju ili više aerosnimaka. S obzirom na to da se računaju koordinate za svaki piksel, rezolucija tako dobivenoga DSM-a odgovara rezoluciji aerosnimaka.

Najprije je izrađen tzv. preliminarni DSM korištenjem unaprijed zadanih osnovnih i dodatnih postavki (parametara) slikovne korelacije. Opis korištenih parametara i njihove vrijednosti dane su u radu Balenović i dr. (2015). U postupku slikovne korelacije i izrade DSM-a može doći do pogrešaka (engl. *matching errors*), bilo kao posljedica primijenjenoga algoritma i kvalitete aerosnimaka (St-Onge i dr. 2008) ili karakteristika snimljene površine (Baltsavias i dr. 2008). Kada se radi DSM za šumska područja, pogreške uglavnom nastaju zbog složene strukture (teksture) šuma, i to najprije zbog sjena na aerosnimkama (npr. uz rub šume ili u progalama), strmih nagiba i velikih visinskih razlika (npr. između dvaju susjednih stabala različite visine) (St-Onge i dr. 2008, Honkavaara i dr. 2012, Nurminen i dr. 2013, White i dr. 2013). Vizualnom evaluacijom DSM-a utvrđene su pogreške koje se očituju kao šiljci (engl. *spikes*) ili male površine čija je nadmorska visina značajno niža od okolice te ih je bilo lako uočiti. Za uklanjanje nastalih pogrešaka primijenjen je PHOTOMOD-ov algoritam »Filter zgrada i vegetacije« (engl. *Buildings and vegetation filter*), odnosno njegov prvi korak koji služi upravo za uklanjanje takvih pogrešaka. Praznine u DSM-u nastale filtriranjem popunjene su interpolacijom (engl. *smooth interpolation method*). Naposljetku, preostale pogreške koje nisu uklonjene primjenom »Filtera zgrada i vegetacije« izdvojene su ručno te su nastale praznine ponovno popunjene postupkom interpolacije. Kao rezultat opisanoga postupka za područje istraživanja izrađen je rasterski DSM prostorne rezolucije 0,32 m (u daljnjem tekstu DSM<sub>0,3</sub>). Radi izrade DSM-ova prostornih rezolucija 0,5 m, 1 m, 2 m i 5 m DSM<sub>0,3</sub> je konvertiran iz rasterskoga u točkasti format. Potom je tako dobiven oblak točaka međusobnoga razmaka 0,32 m prorjeđivan pomoću naredbe »thin-out coefficient«, i to pomoću koeficijentata prorjeđivanja 2, 3, 6 i 15, te su dobiveni oblaci točaka međusobnoga razmaka 0,64 m, 0,97 m, 1,94 m i 4,94 m. Zatim su iz svakoga oblaka točaka izrađene mreže, tj. TIN (nepravilna mreža trokuta, engl. *triangulated irregular network*), koje su potom interpolirane u rasterske DSM-ove prostorne rezolucije 0,5 m (DSM<sub>0,5</sub>), 1 m (DSM<sub>1</sub>), 2 m (DSM<sub>2</sub>) i 5 m (DSM<sub>5</sub>).



**Slika 2.** Postupak izrade digitalnih modela površine (DSM) različitih prostornih rezolucija

**Fig. 2** Methodological workflow of the generation of DSMs of different spatial resolutions

## 2.4 Stereofotogrametrijska izmjera Stereophotogrammetric measurement

Za ocjenu vertikalne točnosti DSM-ova različite prostorne rezolucije upotrijebljeni su podaci manualne stereofotogrametrijske izmjere (Hoby i Ginzler 2012, Ginzler i Hoby 2015, Balenović i dr. 2015). Manualna stereofotogrametrijska izmjera provedena je u modulu PHOTOMOD StereoDraw na sistematskom uzorku mreže točaka (500 × 500 m) na istim aerosnimkama koje su korištene i za izradu DSM-a (slika 1). Stereovizualizacija i stereoizmjera omogućena je pomoću sustava za stereoskopsko promatranje koji čine grafička kartica, stereomonitor i stereonaočale. Na svakoj točki uzorka fotointerpretator je izmjerio vrh trima stablima najbližima točki mreže uzorka. Vrh svakoga stabla

određen je polaganjem stereomarkera na vrh krošnje te je zabilježen točkastim objektom s pripadajućim koordinatama  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Ukupno je stereofotogrametrijski izmjereno 98 točaka, odnosno 294 točke nadmorske visine vrhova stabala.

## 2.5 Analiza podataka – Data analysis

Analiza vertikalne točnosti DSM-ova različite prostorne rezolucije provedena je usporedbom točaka nadmorske visine vrhova stabala izmjerenih manualnom stereofotogrametrijskom izmjerom i njima korespondentnih točaka nadmorske visine očitanih s DSM-ova (DSM<sub>0,3</sub>, DSM<sub>0,5</sub>, DSM<sub>1</sub>, DSM<sub>2</sub> i DSM<sub>5</sub>). U tu su svrhu izračunate ove mjere odstupanja: korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE, prema engl. *root mean*

square error), srednja pogreška (ME, prema engl. *mean error*) i standardna devijacija odstupanja (SD, prema engl. *standard deviation*), i to prema ovim formulama:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{z}_i - z_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{z}_i - z_i)}{n} \quad (2)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((\hat{z}_i - z_i) - \mu)^2}{n - 1}} \quad (3)$$

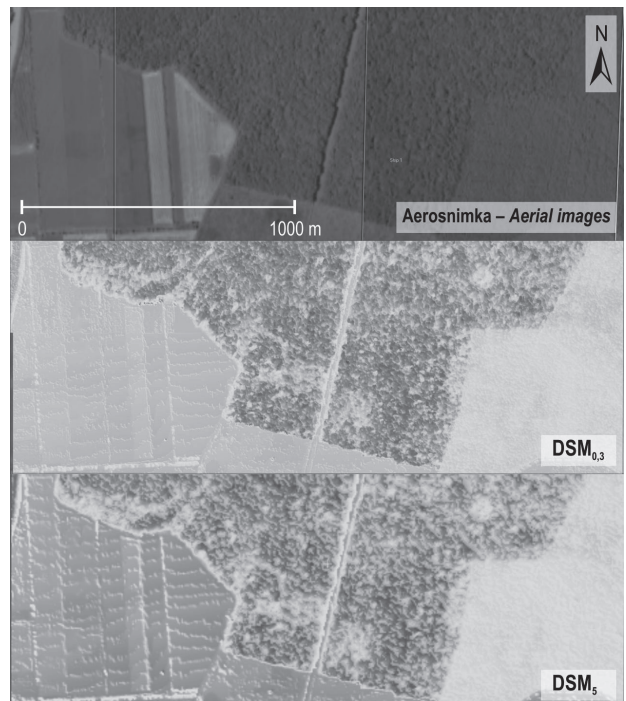
gdje je:

- $\hat{z}_i$  nadmorska visina točke odnosno vrha stabla  $i$  očitana s DSM-a
- $z_i$  nadmorska visina točke odnosno vrha stabla  $i$  izmjerena manualnom stereofotogrametrijskom izmjerom
- $n$  broj točaka (vrhova stabala).

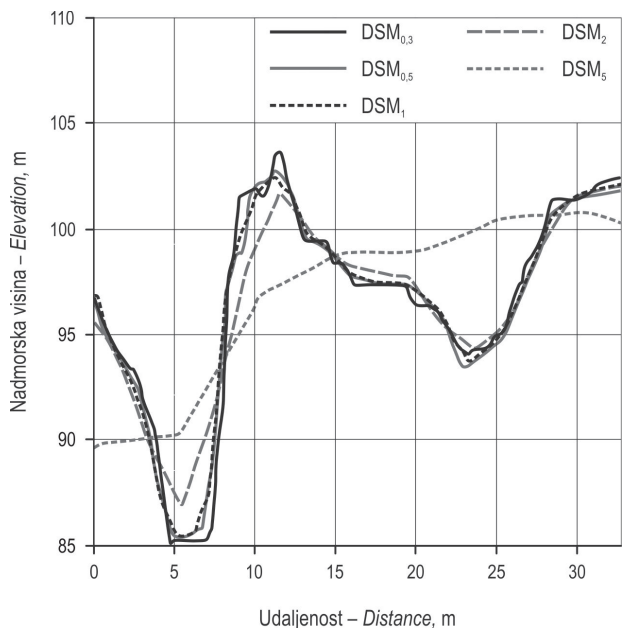
Navedene mjere odstupanja uobičajeno se koriste za ocjenu točnosti DMT-a (Höhle i Höhle 2009, Stereńczak i dr. 2013) i DSM-a (Ginzler i Hoby 2015, Balenović i dr. 2015). Mjere odstupanja izračunate su za svaki DSM za cijelo područje istraživanja ukupno i po dobnim razredima. Osim mjera odstupanja za svaki je DSM iskazan i raspon odstupanja odnosno vrijednosti maksimalnoga pozitivnoga (maks.) te maksimalnoga negativnoga (min.) odstupanja. Analiza i obrada podataka provedena je u programskom paketu STATISTICA 7.1 (Hill i Lewicki 2007).

### 3. Rezultati s raspravom – Results with discussion

Prema očekivanjima vizualnom evaluacijom izrađenih DSM-ova različite prostorne rezolucije utvrđeno je kako DSM<sub>0,3</sub> pruža najveću razlučivost detalja (npr. pojedinačno stablo) koja se postupno smanjuje sa snižavanjem prostorne rezolucije, tako da je u konačnici na DSM<sub>5</sub> moguće razlučiti jedino veće oblike (npr. grupe stabala) (slika 3). Vertikalni profil DSM-ova kroz šumsku sastojinu na dijelu područja istraživanja zorno prikazuje da DSM-ovi više prostorne rezolucije pružaju mnogo više informacija o vertikalnoj strukturi sastojina (slika 4). Primjerice, veće praznine između krošnja u sastojinama vidljive su na svim DSM-ovima, dok su manje praznine u sastojinama izražene i vidljive samo na DSM-ovima više prostorne rezolucije



Slika 3. Primjeri (isječki) izrađenih DSM-ova najviše (DSM<sub>0,3</sub>) i najniže (DSM<sub>5</sub>) prostorne rezolucije  
 Fig. 3 The examples of the generated DSMs of the highest (DSM<sub>0,3</sub>) and lowest (DSM<sub>5</sub>) spatial resolution



Slika 4. Vertikalni profil DSM-ova različite prostorne rezolucije kroz šumsku sastojinu na dijelu područja istraživanja  
 Fig. 4 The vertical profile of DSMs of different spatial resolution through the forest stand in the research area



(DSM<sub>0,3</sub>, DSM<sub>0,5</sub>). Do sličnih zaključaka dolaze i Hoby i Ginzler (2012) koji su uspoređivali vertikalni profil DSM-ova prostorne rezolucije 1 m izrađenih iz ADS80 aerosnimaka GSD 0,25 m i WorldView-2 satelitskih snimaka GSD 0,5 m (pankromatske) i GSD 1,38 m (multispektralne).

Rezultati analize vertikalne točnosti DSM-ova različite prostorne rezolucije dobiveni usporedbom točaka nadmorske visine vrhova stabala izmjerenih manualnom stereofotogrametrijskom izmjerom i nadmorske visine prostorno ( $x, y$ ) korespondentnih točaka očitanih s DSM-ova (DSM<sub>0,3</sub>, DSM<sub>0,5</sub>, DSM<sub>1</sub>, DSM<sub>2</sub> i DSM<sub>5</sub>) prikazani su u tablici 2. Ukupno su izmjerene 294 točke nadmorske visine vrhova stabala sustavno raspoređenih preko cijeloga područja istraživanja (I. dojni razred = 42 stabla, II. d. r. = 66 st., III. d. r. = 30 st., IV. d. r. = 15 st., V. d. r. = 36 st., VI. d. r. = 66 st., VII. d. r. = 39 st.). Sukladno očekivanjima, najveća točnost, odnosno najmanja pogreška (RMSE, ME, SD, raspon odstupanja), dobivena je za DSM najviše prostorne rezolucije (DSM<sub>0,3</sub>). Međutim, gotovo jednaka vertikalna točnost dobivena je za DSM<sub>0,5</sub> i DSM<sub>1</sub>. Nešto slabiji rezultati dobiveni su za DSM<sub>2</sub>, dok su najslabiji rezultati, odnosno najmanja točnost i najveća pogreška ostvareni za DSM<sub>5</sub>.

Dobiveni rezultati u skladu su s rezultatima prethodnoga istraživanja (Balenović i dr. 2015) u okviru kojega je DSM prostorne rezolucije 0,3 m izrađen za područje raznodobnih šumoposjedničkih šuma središnje Hrvatske iz UltraCamX aerosnimaka GSD 0,3 m te korištenjem istoga algoritma slikovne korel-

acije (Dense DTM). Balenović i dr. (2015) također su procjenjivali vertikalnu točnost izrađenoga DSM-a na temelju podataka manualne stereoizmjerne i za područje mješovitih raznodobnih šuma dobili ove rezultate: RMSE = 0,62 m, ME = -0,62 m, SD = 0,44 m. Nadalje, u usporedbi s rezultatima ovoga istraživanja Hoby i Ginzler (2012) i Ginzler i Hoby (2015) dobili su nešto veća odstupanja. Hoby i Ginzler (2012) za brežuljkasto šumsko područje istočne Švicarske ispitali su vertikalnu točnost DSM-a prostorne rezolucije 1 m izrađenoga iz ADS80 aerosnimaka GSD 0,25 m koja je u odnosu na manualnu stereoizmjeru iznosila RMSE = 2,63 m. U sljedećem istraživanju Ginzler i Hoby (2015) iz ADS80 aerosnimaka GSD 0,25 m, koje su pokrivala brežuljkasti dio Švicarske, te ADS80 aerosnimaka GSD 0,5 m, koje su pokrivala planinski dio Švicarske, izradili su DSM prostorne rezolucije 1 m te u odnosu na manualnu stereoizmjeru dobili vertikalnu pogrešku (RMSE) u rasponu od 3,34 do 5,54 m ovisno o tipu šume (četinjače, listače). Razlozi većih odstupanja najvjerojatnije leže u činjenici da su oba navedena istraživanja provedena na brežuljkastom i planinskom području heterogene šumske strukture te je istraživanjima obuhvaćena mnogo veća površina.

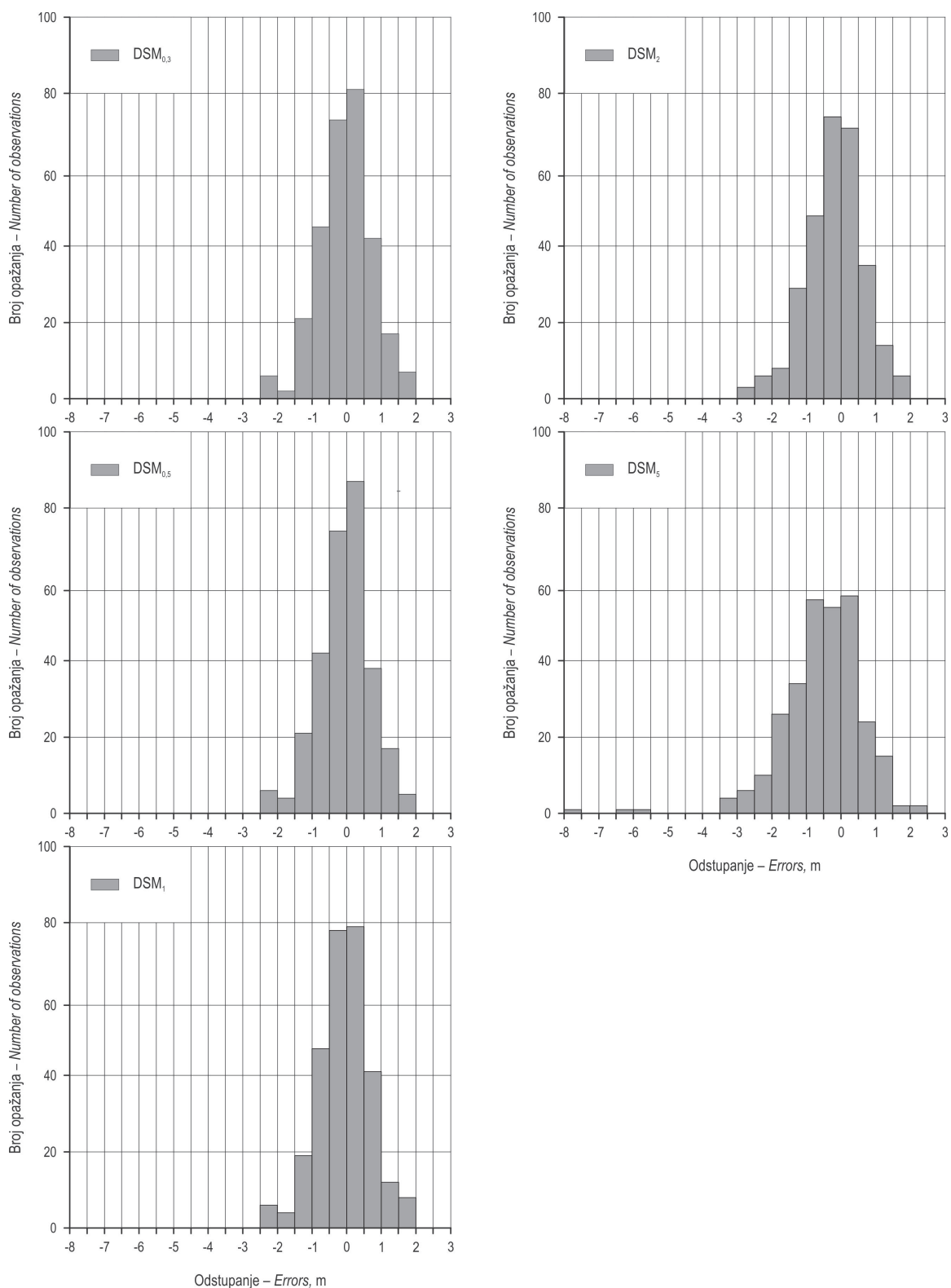
Za sve DSM-ove dobivene su negativne vrijednosti srednje pogreške (ME) (tablica 2) koje ukazuju na podcjenjivanje nadmorske visine vrhova stabala očitane s DSM-ova u odnosu na nadmorsku visinu dobivenu stereoizmjerom. Za DSM<sub>0,3</sub>, DSM<sub>0,5</sub>, DSM<sub>1</sub> i DSM<sub>2</sub> dobivene su vrlo male negativne vrijednosti srednje pogreške u rasponu od -0,07 do -0,16 m, što upućuje na neznatno podcjenjivanje nadmorske visine. Potvrda tomu su i histogrami na slici 5 koji prikazuju distribuciju odstupanja nadmorske visine vrhova stabala očitane s DSM<sub>0,3</sub>, DSM<sub>0,5</sub>, DSM<sub>1</sub> i DSM<sub>2</sub> u odnosu na nadmorsku visinu dobivenu stereoizmjerom. Iako su sve distribucije pogrešaka blago negativno skošene, provedenim Shapiro-Wilkovim testom normalnosti (alfa razina  $p = 0,05$ ) utvrđeno je kako se ni za jednu od njih ne može odbaciti nulta hipoteza da su te distribucije normalne. Nasuprot tomu, za DSM<sub>5</sub> dobivena srednja pogreška od -0,56 m (tablica 2) te histogram pojedinačnih odstupanja (slika 5) upućuju na znatno učestalije podcjenjivanje nadmorske visine očitane s DSM<sub>5</sub> (jača negativna skošenost distribucije pogrešaka). Prema autorima Baltsavias i dr. (2008) fotogrametrijski DSM-ovi izrađeni iz aerosnimaka uvijek imaju tendenciju podcjenjivanja stvarne visine kao posljedica postupka zaglađivanja površine (engl. *surface smoothing*) tijekom slikovne korelacije. Jedan od glavnih razloga većega podcjenjivanja nadmorske visine očitane s DSM<sub>5</sub>, u usporedbi s podcjenjivanjem visine očitane s DSM<sub>0,3</sub>, DSM<sub>0,5</sub>, DSM<sub>1</sub> i DSM<sub>2</sub>, značajnije je prorjeđivanje oblaka točaka iz kojih je izrađen TIN

**Tablica 2.** Vertikalna točnost DSM-ova različite prostorne rezolucije (DSM<sub>0,3</sub>, DSM<sub>0,5</sub>, DSM<sub>1</sub>, DSM<sub>2</sub>, DSM<sub>5</sub>) procijenjena na temelju podataka manualne stereofotogrametrijske izmjere (RMSE – korijen srednje kvadratne pogreške, ME – srednja pogreška, SD – standardna devijacija)

**Table 2** The vertical accuracy of DSMs of different spatial resolutions (DSM<sub>0,3</sub>, DSM<sub>0,5</sub>, DSM<sub>1</sub>, DSM<sub>2</sub>, DSM<sub>5</sub>) evaluated with manual stereo measurements (RMSE – root mean square error, ME – mean error, SD – standard deviation)

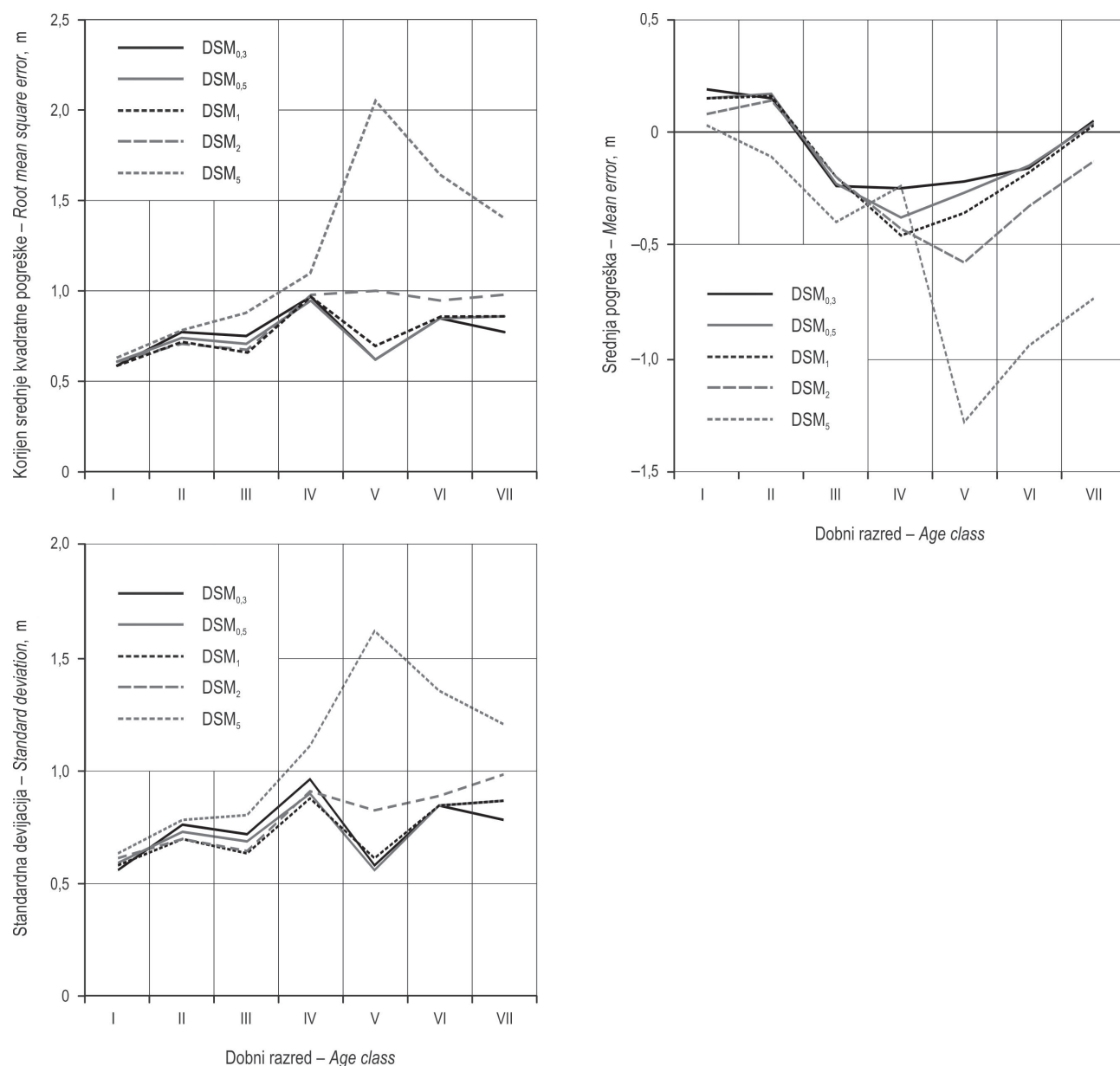
Digitalni model površine <i>Digital surface model</i>	RMSE m	ME m	SD m	Raspon odstupanja <i>Range of errors</i>	
				Min. m	Maks. m
DSM <sub>0,3</sub>	0,76	-0,03	0,76	-2,42	1,88
DSM <sub>0,5</sub>	0,76	-0,05	0,76	-2,47	1,89
DSM <sub>1</sub>	0,76	-0,07	0,76	-2,42	1,79
DSM <sub>2</sub>	0,84	-0,16	0,83	-2,71	1,70
DSM <sub>5</sub>	1,31	-0,54	1,19	-7,89	2,26





**Slika 5.** Histogrami pojedinačnih odstupanja nadmorske visine vrhova stabala očitane s DSM-ova različite prostorne rezolucije u odnosu na nadmorsku visinu dobivenu manualnom stereofotogrametrijskom izmjerom

**Fig. 5** Histograms of individual residuals between tree top elevations obtained from DSMs of different spatial resolution and by manual stereophotogrammetric measurement



**Slika 6.** Vertikalna točnost DSM-ova različitih prostornih rezolucija iskazana po dobnim razredima šumskih sastojina (RMSE – korijen srednje kvadratne pogreške, ME – srednja pogreška, SD – standardna devijacija)

**Fig. 6** The vertical accuracy of DSMs of different spatial resolutions according to age classes of forest stands (RMSE – root mean square error, ME – mean error, SD – standard deviation)

te potom interpolacijom DSM<sub>5</sub>. Osim toga, ako se radi o rjeđim sastojinama, tj. sastojinama u kojima su provedene sječe prethodnoga priroda ili započete oplodne sječe, podcjenjivanje je izraženije jer dio točaka zbog veličine DSM<sub>5</sub> piksela obuhvaća i dio krošnje stabla i praznine među stablima. Upravo iz toga razloga dolazi do određenoga broja pojedinačnih podcjenjivanja nadmorske visine očitane s DSM<sub>5</sub> koja iznosi i do  $-7,89$  m (tablica 2, slika 5). To je vidljivo i na

grafovima na slici 6 koja prikazuje vertikalnu točnost, odnosno pogreške DSM-ova, po dobnim razredima šumskih sastojina. Do najvećega podcjenjivanja nadmorske visine očitane s DSM<sub>5</sub> dolazi u sastojinama V., VI. i VII. d. r. Općenito, svi DSM-ovi u prosjeku pre-cjenjuju nadmorske visine u sastojinama I. i II. d. r. (uz izuzetak DSM<sub>5</sub> u sastojinama II. d. r.). Nadalje, od III. do VII. d. r. nadmorska visina očitana s DSM-ova podcjenjuje nadmorsku visinu dobivenu stereozmjerom.

Izuzetak čine DSM<sub>0,3</sub>, DSM<sub>0,5</sub> i DSM<sub>1</sub> na temelju kojih su u sastojinama VII. d. r. dobivene neznatno precijenjene vrijednosti nadmorske visine. Nadalje, promatrano kroz prizmu RMSE (slika 6) vidljivo je da DSM<sub>0,3</sub>, DSM<sub>0,5</sub> i DSM<sub>1</sub> imaju gotovo jednake pogreške procjene nadmorske visine u svim dobnim razredima te da ne postoji izražen trend rasta ili smanjenja pogreške s povećanjem dobnoga razreda odnosno promjenom strukturnih elemenata sastojina (dob, gustoća sastojina, srednji sastojinski promjer, srednja sastojinska visina, temeljnica, obujam). Nešto veći iznosi RMSE dobiveni su za DSM<sub>2</sub>, a značajno veći za DSM<sub>5</sub>. Kod DSM<sub>2</sub> vidljiv je porast RMSE s povećanjem dobnoga razreda, dok je kod DSM<sub>5</sub> također vidljiv porast RMSE do V. d. r. te smanjenjem prema VII. dobnomu razredu.

Na temelju dobivenih rezultata vidljivo je kako DSM<sub>0,5</sub> i DSM<sub>1</sub> pružaju mogućnost očitavanja nadmorske visine vrhova stabala s gotovo jednakom točnošću kao i izvorni DSM<sub>0,3</sub>. Daljnjim smanjenjem rezolucije rasterskoga DSM-a smanjuje se i točnost dobivenih podataka, tako da DSM<sub>2</sub> daje nešto slabije rezultate, dok najslabije rezultate daje digitalni model površine najniže prostorne rezolucije – DSM<sub>5</sub>. Odabir prostorne rezolucije digitalnih modela površine za primjenu u inventuri šuma treba ovisiti u prvom redu o njegovoj namjeni, tj. o razini na kojoj će se prikupljati informacije o šumama. Ako će se DSM, u kombinaciji s DMR-om, koristiti za izradu CHM-a te pridobivanje informacija na razini pojedinačnih stabla (engl. *individual tree-based approach*) (Rahlf i dr. 2015, St-Onge i dr. 2015), tada je uputno koristiti DSM najveće moguće rezolucije. U ovom slučaju to je DSM<sub>0,3</sub>, ali je svakako potrebno istražiti i mogućnost korištenja DSM<sub>0,5</sub> za procjenu varijabli pojedinačnih stabala. Naime, svakim smanjenjem prostorne rezolucije znatno se olakšava i ubrzava izrada DSM-a i procesiranje prostornih podataka. Rezultati dobiveni ovim, kao i drugim istraživanjima (Straub i dr. 2013, White i dr. 2015, Puliti i dr. 2016), upućuju na to da bi za pridobivanje informacija na razini plohe (engl. *area-based approach*) DSM<sub>0,5</sub> i DSM<sub>1</sub> mogli pružiti zadovoljavajuće rezultate, dok je za pridobivanje informacija na razini sastojine dostatno koristiti DSM<sub>1</sub> i DSM<sub>2</sub>. S obzirom na dobivena značajna odstupanja uporaba je DSM<sub>5</sub> upitna. Za potvrdu navedenoga daljnja istraživanja trebaju biti usmjerena na ispitivanje mogućnosti korištenja DSM-ova odnosno CHM-ova različitih prostornih rezolucija u inventuri šuma na različitim prostornim razinama (pojedinačno stablo, ploha, sastojina).

#### 4. Zaključci – Conclusions

U okviru ovoga istraživanja za područje nizinskih šuma hrasta lužnjaka (GJ Kunjevci, UŠP Vinkovci) iz-

rađeni su DSM-ovi različite prostorne rezolucije (0,3 m – 0,5 m – DSM<sub>0,5</sub>, 1 m – DSM<sub>1</sub>, 2 m – DSM<sub>2</sub>, 5 m – DSM<sub>5</sub>) metodom slikovne korelacije digitalnih stereo-aerofotogrametrijskih slika GSD 30 cm. Vertikalna točnost DSM-ova, ispitana usporedbom nadmorske visine vrhova stabala izmjerene manualnom stereofotogrametrijskom izmjerom i nadmorske visine očitane s DSM-ova, dobivena je za DSM<sub>0,3</sub> (najmanji RMSE, ME, SD). Gotovo jednaka točnost dobivena je za DSM<sub>0,5</sub> i DSM<sub>1</sub>, nešto slabija za DSM<sub>2</sub>, a najmanja za DSM<sub>5</sub>. Također, za DSM<sub>5</sub> dobivena su značajnija negativna odstupanja (podcjenjivanje) očitane nadmorske visine u usporedbi s manualnom stereozmjerom. Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da smanjivanje prostorne rezolucije (veličine piksela) rasterskih DSM-ova s 0,3 m na 1 m ne utječe značajno na vertikalnu točnost DSM-a, odnosno na točnost procjene nadmorske visine vrhova stabala. Daljnjim smanjivanjem prostorne rezolucije do 2 m, a osobito do 5 m, smanjuje se vertikalna točnost DSM-ova do razine koja dovodi u pitanje njihovu primjenjivost za procjenu visine stabala/sastojine. S obzirom na dobivene rezultate buduća istraživanja trebala bi dodatno ispitati mogućnosti primjene DSM-ova različite prostorne rezolucije u inventuri šuma, i to: DSM<sub>0,3</sub> i DSM<sub>0,5</sub> za pridobivanje informacija na razini pojedinačnih stabala, DSM<sub>0,5</sub> i DSM<sub>1</sub> na razini plohe te DSM<sub>1</sub>, DSM<sub>2</sub> i DSM<sub>5</sub> na razini sastojine.

#### Zahvala – Acknowledgments

Istraživanje je provedeno u sklopu projekta »Procjena i predviđanje produktivnosti šumskoga ekosustava objedinjavanjem terenskih izmjera, daljinskih istraživanja i modeliranja« – EFFeCTivity (UIP-11–2013–2492) koji financira Hrvatska zaklada za znanost.

#### 5. Literatura – References

- Balenović, I., H. Marjanović, D. Vuletić, E. Paladinić, M. Z. Ostrogović Sever, K. Indir, 2015: Quality assessment of high density digital surface model over different land cover classes. *Periodicum biologorum* 117(4): 459–470.
- Baltsavias, E., A. Gruen, H. Eisenbeiss, L. Zhang, L. T. Waser, 2008: High-quality image matching and automated generation of 3D tree models. *International Journal of Remote Sensing* 29(5): 1243–1259.
- Bohlin, J., J. Wallerman, J. E. S. Fransson, 2012: Forest variable estimation using photogrammetric matching of digital aerial images in combination with a high-resolution DEM. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27(7): 692–699.
- Ginzler, C., M. L. Hobi, 2015: Countrywide Stereo-Image Matching for Updating Digital Surface Models in the Framework of the Swiss National Forest Inventory. *Remote Sensing* 7(4): 4343–4370.

- Gobakken, T., O. M. Bollandsås, E. Næsset, 2015: Comparing biophysical forest characteristics estimated from photogrammetric matching of aerial images and airborne laser scanning data. *Scandinavian Journal of Forest Research* 30(1): 73–86.
- Granhölm, A. E., A. Olsson, M. Nilsson, A. Allard, J. Holmgren, 2015: The potential of digital surface models based on aerial images for automated vegetation mapping. *International Journal of Remote Sensing* 36(7): 1855–1870.
- Guerra-Hernández, J., E. Bastos Görgens, J. García-Gutiérrez, L. C. Estraviz Rodríguez, M. Tomé, E. González-Ferreiro, 2016: Comparison of ALS based models for estimating aboveground biomass in three types of Mediterranean forest. *European Journal of Remote Sensing* 49: 185–204.
- Hill, T., P. Lewicki, 2007 *STATISTICS: Methods and Applications*. StatSoft, Tulsa, OK.
- Hinz, A., C. Dörstel, H. Heier, 2001: DMC – The digital sensor technology of Z/I imaging. *Proceedings of the Photogrammetric week 2001*. Institute for Photogrammetry, University of Stuttgart, Germany, 93–103.
- Hobi, M. L., C. Ginzler, 2012: Accuracy Assessment of Digital Surface Models Based on WorldView-2 and ADS80 Stereo Remote Sensing Data. *Sensors* 12(5): 6347–6368.
- Höhle, J., M. Höhle, 2009: Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64(4): 398–406.
- Honkavaara, E., L. Markelin, T. Rosnell, K. Nurminen, 2012: Influence of solar elevation in radiometric and geometric performance of multispectral photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 67: 13–26.
- Järndstedt, J., A. Pekkarinen, S. Tuominen, C. Ginzler, M. Holopainen, R. Viitala, 2012: Forest variable estimation using a high-resolution digital surface model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 74: 78–84.
- Leberl, F., A. Irschara, T. Pock, P. Meixner, M. Gruber, S. Scholz, A. Wiechert, 2010: Point Clouds: Lidar versus 3D Vision. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 76(10): 1123–1134.
- Nurminen, K., M. Karjalainen, X. Yu, J. Hyypä, E. Honkavaara, 2013: Performance of dense digital surface models based on image matching in the estimation of plot-level forest variables. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 83: 104–115.
- Paparoditis, N., L. Polidori, 2002: *Overview of digital surface models*. Digital photogrammetry (U: Egels, Y., M. Kasser), Taylor and Francis, London, New York, 159–163.
- Pitt, D. G., M. Woods, M. Penner, 2014: A Comparison of Point Clouds Derived from Stereo Imagery and Airborne Laser Scanning for the Area-Based Estimation of Forest Inventory Attributes in Boreal Ontario. *Canadian Journal of Remote Sensing* 40(3): 214–232.
- Puliti, S., T. Gobakken, H. O. Ørka, E. Næsset, 2016: Assessing 3D point clouds from aerial photographs for species-specific forest inventories. *Scandinavian Journal of Forest Research*, doi: <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2016.1186727>
- Rahlf, J., J. Breidenbach, S. Solberg, E. Næsset, R. Astrup, 2014: Comparison of four types of 3D data for timber volume estimation. *Remote Sensing of Environment* 155: 325–333.
- Rahlf, J., J. Breidenbach, S. Solberg, R. Astrup, 2015: Forest Parameter Prediction Using an Image-Based Point Cloud: A Comparison of Semi-ITC with ABA. *Forests* 6(11): 4059–4071.
- Stepper, S., C. Straub, H. Pretzsch, 2015: Assessing height changes in a highly structured forest using regularly acquired aerial image data. *Forestry* 88(3): 304–316.
- Stereńczak, K., M. Zasada, M. Brach, 2013: The Accuracy Assessment of DTM Generated from LIDAR Data for Forest Area – a case Study for Scots Pine Stands in Poland. *Baltic Forestry* 19(2): 252–262.
- St-Onge, B., C. Véga, R.A. Fournier, Y. Hu, 2008: Mapping canopy height using a combination of digital stereo-photogrammetry and lidar. *International Journal of Remote Sensing* 29(11): 3343–3364.
- St-Onge, B., F. A. Audet, J. Bégin, 2015: Characterizing the Height Structure and Composition of a Boreal Forest Using an Individual Tree Crown Approach Applied to Photogrammetric Point Clouds. *Forests* 6(11): 3899–3922.
- Straub, C., C. Stepper, R. Seitz, L. T. Waser, 2013: Potential of UltraCamX stereo images for estimating timber volume and basal area at the plot level in mixed European forests. *Canadian Journal of Forest Research* 43(8): 731–741.
- Tanhuanpää, T., N. Saarinen, V. Kankare, K. Nurminen, M. Vastaranta, E. Honkavaara, M. Karjalainen, X. Yu, M. Holopainen, J. Hyypä, 2016: Evaluating the Performance of High-Altitude Aerial Image-Based Digital Surface Models in Detecting Individual Tree Crowns in Mature Boreal Forests. *Forests* 7(7): 143.
- White, J. C., M. A. Wulder, M. Vastaranta, N. C. Coops, D. Pitt, M. Woods, 2013: The utility of image-based point clouds for forest inventory: A comparison with airborne laser scanning. *Forests* 4(3): 518–536.
- White, J. C., C. Stepper, P. Tompalski, N. C. Coops, M. A. Wulder, 2015: Comparing ALS and Image-Based Point Cloud Metrics and Modelled Forest Inventory Attributes in a Complex Coastal Forest Environment. *Forests* 6(10): 3704–3732.



---

**Abstract**


---

*Selection of the Optimal Spatial Resolution of Image-Based Digital Surface Models for Use in Forestry – Example from the Area of Lowland Oak Forests*

*In recent years, digital aerial photogrammetry has emerged as an alternative method to airborne laser scanning in three-dimensional modelling of forest areas, especially for the generation of digital surface models (DSMs). In forest inventory, DSM is usually used in combination with the corresponding digital terrain model for the generation of canopy height model (CHM), which is then used as a basis for deriving various tree and forest attributes.*

*The main aim of this research was to examine the vertical accuracy of DSMs of different spatial resolutions over the forest area, and with new findings contribute to the application of digital photogrammetry in forest science and practice. For that purpose, DSMs with spatial resolution (pixel size) of 0.3 m (DSM<sub>0.3</sub>), 0.5 m (DSM<sub>0.5</sub>), 1 m (DSM<sub>1</sub>), 2 m (DSM<sub>2</sub>) and 5 m (DSM<sub>5</sub>) were generated by image matching of digital aerial images for the area of lowland pedunculate oak forests (management unit Kunjevc, Forest Administration Vinkovci). The vertical accuracy of DSMs was evaluated by comparing manually stereo measured elevations of 294 tree tops with the elevations of planimetrically corresponding DSMs points.*

*As expected, the highest accuracy was obtained for DSM<sub>0.3</sub> (root mean square error, RMSE = 0.76 m; mean error, ME = -0.03 m). Almost equal accuracy was obtained for DSM<sub>0.5</sub> (RMSE = 0.76 m; ME = -0.05 m) and DSM<sub>1</sub> (RMSE = 0.76 m; ME = -0.07 m), slightly lower for DSM<sub>2</sub> (RMSE = 0.84 m; ME = -0.16 m), whereas the lowest accuracy was obtained for DSM<sub>5</sub> (RMSE = 1.31 m; ME = -0.54 m).*

*The accuracy comparison showed that the decreasing of spatial resolution (pixel size) of raster based DSMs from 0.3 m to 1 m, does not significantly affect their vertical accuracy. With further decreasing of spatial resolution to 2 m, and especially to 5 m, the vertical accuracy of DSMs also decreases. In the light of the obtained results, further studies should be focused on research of possibilities of application of DSMs of different spatial resolution in forest inventory, namely: DSM<sub>0.3</sub> and DSM<sub>0.5</sub> for obtaining information at tree level, DSM<sub>0.5</sub> and DSM<sub>1</sub> at plot level, and DSM<sub>1</sub>, DSM<sub>2</sub> and DSM<sub>5</sub> at stand level.*

*Keywords: digital surface model (DSM), digital photogrammetry, aerial images, image matching, forest inventory*

---

Adresa autorâ – Authors' address:

Dr. sc. Ivan Balenović \*  
 e-pošta: ivanb@sumins.hr  
 Dr. sc. Hrvoje Marjanović  
 e-pošta: hrvojem@sumins.hr  
 Hrvatski šumarski institut  
 Zavod za uređivanje šuma i šumarsku ekonomiku  
 Trnjanska cesta 35  
 10 000 Zagreb  
 HRVATSKA

\* Glavni autor – Corresponding author

Primljeno (Received): 23. 08. 2016.  
 Prihvaćeno (Accepted): 13. 09. 2016.