

Fotogrametrijska procjena srednjih sastojinskih visina odvojeno po vrstama drveća u mješovitim sastojinama središnje Hrvatske

Ante Seletković, Marija Perić, Ivan Balenović

Nacrtak – Abstract

U radu je ispitana točnost fotogrametrijske procjene srednje sastojinske visine odvojeno po glavnim vrstama drveća (hrast kitnjak, obična bukva, obični grab) na brežuljkastom području šumoposjedničkih šuma središnje Hrvatske. U istraživanju su korištene digitalne stereo-aerodinike prostorne rezolucije GSD 30 cm te digitalni vektorski podaci za izradu digitalnoga modela reljefa (DMR-a). Stereofotogrametrijska izmjera visine stabala provedena je na fotogrametrijskim plohama postavljenim na aerodinikama na temelju GPS-om snimljenih prostornih koordinata (x, y) središta terenskih. Fotogrametrijska visina svakoga stabla na plohi izračunata je kao razlika nadmorske visine vrha stabla određena na aerodinikama i podnožja stabla dobivena iz DMR-a. Točnost fotogrametrijski procijenjene visine pojedinih vrsta drveća ispitana je usporedbom s referentnom terenski procijenjenom visinom. Radi toga je za svaki odsjek izračunata fotogrametrijski i terenski srednja sastojinska visina odvojeno po vrstama drveća. Srednja sastojinska visina izračunata je kao aritmetička sredina svih izmjerenih visina unutar odsjeka.

Za sve tri promatrane vrste drveća (hrast kitnjak, obična bukva, obični grab) dobivena su vrlo slična odstupanja fotogrametrijski procijenjene srednje sastojinske visine u odnosu na referentne terenske vrijednosti. Ipak, najtočniji rezultati dobiveni su za obični grab ($MD = -1,97\%$, $RMSE_{\%} = 8,29\%$), a nešto slabiji za običnu bukvu ($MD = 2,16\%$, $RMSE_{\%} = 10,16\%$) i hrast kitnjak ($MD = 3,06\%$, $RMSE_{\%} = 10,27\%$). Rezultati su istraživanja potvrdili veliku mogućnost primjene digitalnih aerodinika visoke prostorne rezolucije u inventuri šuma, odnosno pri procjeni srednje sastojinske visine.

Ključne riječi: stereofotogrametrija, digitalne aerodinike, visina stabla, mješovite šumske sastojine, izmjera šuma

1. Uvod – Introduction

Visina stabala ima veliku važnost za kvantitativan opis stabla i sastojina (npr. određivanje boniteta staništa sastojine, procjena drvene zalihe, biomase, zaliha ugljika, rasta sastojine itd.) (Pranjic i Lukić 1997). Međutim, visinu stabala nije lako izmjeriti na terenu. U usporedbi s izmjerom prsnoga promjera stabala izmjera visine pod većim je utjecajima pogrešaka mjeritelja, koje su često uvjetovane vizualnim smetnjama pri točnom određivanju vrhova stabala. Osim klasičnih terenskih metoda visinu stabala i sastojina moguće je

procjenjivati i metodama daljinskih istraživanja (Van Laar i Akça 2007). Zasigurno najčešće primjenjivana metoda daljinskih istraživanja pri procjeni visine stabala jest stereofotogrametrijska izmjera aerodinika. Danas, u doba digitalne fotogrametrije, mogu se razlikovati manualne (npr. Eid i dr. 2004, Magnusson i dr. 2007, Shimizu i dr. 2014, Balenović i dr. 2015, 2016) i automatizirane (npr. Korpela 2004, Bohlin i dr. 2012, White i dr. 2015) metode fotogrametrijske izmjere visine pojedinačnih stabala i šumskih sastojina korištenjem digitalnih stereo-aerodinika. Ako se radi o manualnim metodama fotogrametrijske izmjere, visina

pojedinačnoga stabla dobije se kao razlika nadmorske visine vrha i podnožja stabla. Vrh se stabla određuje polaganjem stereomarkera na vrh krošnje, dok se podnožje stabla određuje polaganjem stereomarkera na vidljivi dio tla pokraj stabla (Magnusson i dr. 2007, Shimizu i dr. 2014) ili, ako je riječ o gustim sklopljenim sastojinama u kojima nije vidljivo tlo pokraj stabla, iz ortogonalne projekcije vrha stabla na pripadajući digitalni model reljefa (DMR) (Balenović i dr. 2015, 2016).

Rezultati dosadašnjih istraživanja pokazali su velike mogućnosti primjene manualnih metoda fotogrametrijske izmjere digitalnih aerosnimaka u inventuri šuma, ponajprije za procjenu srednjih sastojinskih visina (Eid i dr. 2004, Magnusson i dr. 2007, Balenović i dr. 2015, 2016). Međutim, u većini navedenih istraživanja promatrana je točnost procjene ukupne srednje sastojinske visine, dok mogućnost procjene srednje sastojinske visine pojedinih vrsta drveća u mješovitim sastojinama nije razmatrana. Stoga je ovaj rad nastavak dosadašnjih istraživanja (Balenović i dr. 2015, 2016) te mu je cilj da se ispita mogućnost primjene fotogrametrijske izmjere aerosnimaka za procjenu srednje sastojinske visine odvojeno po vrstama drveća u mješovitim sastojinama šumoposjedničkih šuma središnje Hrvatske.

2. Materijal i metode – *Materials and methods*

Istraživanje je provedeno u šumoposjedničkim šumama gospodarske jedinice Donja Kupčina – Pisarovina, koja je smještena u središnjem dijelu Hrvatske, 25 km južno od Zagreba. Istraživanjem je obuhvaćeno ukupno 14 odsjeka približne površine 480 ha (slika 1). Od toga 5 odsjeka pripada jednodobnim sastojinama hrasta kitnjaka (*Quercus petraea* L.), 6 odsjeka pripada raznodobnim sastojinama uređajnoga razreda obične bukve (*Fagus sylvatica* L.), a 3 raznodobnim sastojinama običnoga graba (*Carpinus betulus* L.). Osim glavnih vrsta drveća (hrast kitnjak, obična bukva, obični grab), u manjoj ili većoj mjeri pridolaze još crna joha (*Alnus glutinosa* [L.] Gaertn), divlja trešnja (*Prunus avium* L.), obični bagrem (*Robinia pseudoacacia* L.), trepetljika (*Populus tremula* L.), obična breza (*Betula pendula* Roth) i dr. Nadmorska visina područja istraživanja kreće se od 100 do 160 m, a nagibi su u rasponu od 0° do 30°.

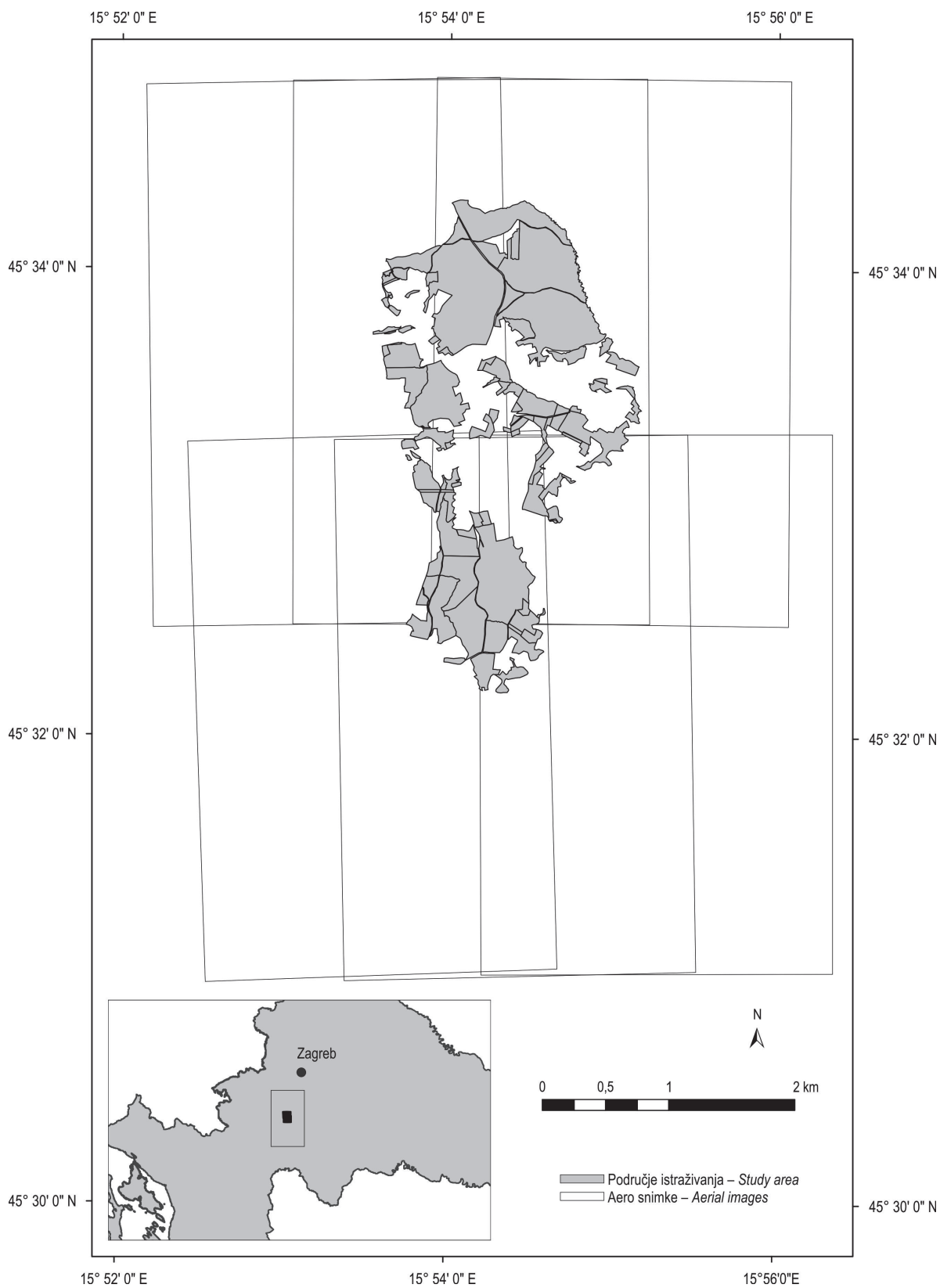
Kao referentni podaci za usporedbu s rezultatima fotogrametrijske izmjere visine u radu su korišteni terenski podaci prikupljeni u sklopu redovite uređajne inventure šuma GJ tijekom proljeća i ljeta 2009. godine. Terenska izmjera provedena je prema tada važećemu Pravilniku o uređivanju šuma (NN 111/06, 141/08) na sistematskom uzorku (100 × 100 m, 100 × 200 m,

200 × 100 m) kružnih ploha radijusa 8 ili 12 m (ovisno o gustoći i dobi sastojina). Postavljene su 183 kružne plohe. Svim stablima na plohama iznad taksacijske granice od 10 cm mjereno je prsni promjer, dok je visina mjerena određenom broju stabala na području istraživanja na temelju čega su konstruirane lokalne visinske krivulje korištenjem Mihajlovljeve funkcije (Michailloff 1943). Visinske krivulje korištene su za izračun visine onih stabala kojima nije terenski izmjerena visina. Detaljan opis visinskih krivulja (uzorak stabala, parametri izjednačenja, koeficijenti determinacije, korijen srednje kvadratne pogreške) prikazan je u radu Balenović i dr. (2015). Nadalje, prostorni položaji središta primjernih ploha (x , y koordinate) snimljeni su s GPS-ovim prijamnikom (MobileMapper 6, Magellan Navigation Inc, Santa Clara, California, USA).

Za fotogrametrijsku izmjeru korištene su digitalne infracrvene kolorne (ICK) stereo-aerosnimke prostorne rezolucije GSD 30 cm (GSD – eng. *Ground Sample Distance*) te trodimenzionalni vektorski podaci na temelju kojih je izrađen digitalni model reljefa (DMR). Fotogrametrijski materijal snimila je i izradila tvrtka Geofoto d.o.o. Zagreb prema specifikacijama proizvođa Državne geodetske uprave. Aerosnimanje područja istraživanja provedeno je pri prosječnoj visini leta zrakoplova od oko 4190 m s digitalnom aerofotogrametrijskom kamerom velika formata Microsoft UltraCamX (Microsoft, Vexcel Imaging GmbH, Graz, Austrija) (Gruber i dr. 2008) u srpnju 2009. godine. Područje je pokriveno s ukupno 6 snimaka u 2 niza (slika 1). Uzdužni preklop snimaka iznosio je 60 %, a poprečni 30 %. Zajedno s digitalnim aerosnimkama dostavljeni su i parametri aerotriangulacije (unutarnje, relativne, vanjske te parametri izjednačenja bloka aerosnimaka).

Cjelokupni postupak fotogrametrijskoga procesiranja (orijentacija aerosnimaka, izrada stereomodela aerosnimaka, izrade DMR-a, izmjera visine) proveden je na digitalnoj fotogrametrijskoj stanici primjenom fotogrametrijskoga softvera PHOTOMOD 5.24 (Racurs Co., Moscow, Russia). Detaljan opis opreme (DFS, softveri) i metode (fotogrametrijske izmjere visine) korištenih u istraživanju te izrade DMR-a odnosno DMV-a dan je u radovima Balenović i dr. (2015, 2016). Ukratko, orijentacija snimaka i izrada stereomodela provedena je na temelju dostavljenih parametara aerotriangulacije u PHOTOMOD AT modulu. Rasterski DMR veličine piksela 1×1 m izrađen je u PHOTOMOD DTM modulu iz 3D vektorskih podataka kreiranjem nepravilne mreže trokuta te njezinom interpolacijom u rasterski oblik.

Stereofotogrametrijska izmjera visine stabala provedena je u PHOTOMOD StereoDraw modulu na



Slika 1. Područje istraživanja s prostornim rasporedom aerosnimaka

Fig. 1 Study area with the spatial distribution of aerial images

fotogrametrijskim ploham postavljenim na aerosnimkama na temelju GPS-om snimljenih prostornih koordinata (x, y) središta terenskih. Svakomu stablu na fotogrametrijskoj plohi interpretirana je vrsta drveća te određen vrh stabla polaganjem stereomarkera na vrh krošnje. Vrh stabla zabilježen je 3D točkastim vektorskim objektom s pripadajućim x, y, z koordinatama. Vizualna interpretacija vrsta drveća provedena je na temelju raspoznavanja slikovnih značajki krošanja, točnije općega izgleda (oblik krošnje, struktura i tekstura) i boje krošnje. Pri tome su pomogle spoznaje o provedenim istraživanjima o načinu preslikavanja pojedinih vrsta drveća na ICK aerosnimkama (Pernar 1994, Pernar i dr. 2007a, 2007b, 2008 itd.) te zapažanja tijekom terenskih radova u okviru ovoga istraživanja. Interpretirane su glavne vrste drveća područja istraživanja (hrast kitnjak, obična bukva i obični grab), dok su ostale sporedne vrste drveća grupirane u kategoriju »ostalo«. Na temelju 3D točkastih objekata očitana je nadmorska visina vrhova stabala, dok je nadmorska visina podnožja stabala dobivena iz ortogonalne projekcije vrhova stabala na tlo odnosno DMR. Fotogrametrijska visina svakoga stabla na plohi izračunata je kao razlika fotogrametrijski određene nadmorske visine vrha i podnožja stabla.

Točnost fotogrametrijski procijenjenih visina odvojeno po vrstama drveća ispitana je usporedbom s referentnim terenski procijenjenim visinama. U tu je svrhu za svaki odsjek izračunata fotogrametrijska i terenska srednja sastojinska visina pojedinih vrsta drveća (hrast kitnjak, obična bukva, obični grab) i kategorije »ostalo«. Srednja sastojinska visina izračunata je kao aritmetička sredina svih izmjerenih visina unutar odsjeka. Za ocjenu točnosti fotogrametrijski procijenjene srednje sastojinske visine odvojeno po vrstama drveća za svaki su odsjek izračunata odstupanja (D , prema eng. *differences*) fotogrametrijski procijenjenih od terenski procijenjenih vrijednosti. Nadalje, kao mjere odstupanja za cijelo područje istraživanja za svaku vrstu drveća izračunati su: srednje odstupanje (MD , prema eng. *mean difference*) i korijen srednje kvadratne pogreške ($RMSE$, prema eng. *root mean square error*). Navedene mjere odstupanja izračunate su u mjernim jedinicama (metrima) te u postotnom iznosu od referentne terenske vrijednosti prema formulama:

$$D = H_{PH-i} - H_{F-i} \quad (1)$$

$$D_{\%} = \frac{H_{PH-i} - H_{F-i}}{H_{F-i}} \times 100 \quad (2)$$

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{PH-i} - H_{F-i})}{n} \quad (3)$$

$$MD_{\%} = \frac{MD}{\bar{H}_F} \times 100 \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{PH-i} - H_{F-i})^2}{n}} \quad (5)$$

$$RMSE_{\%} = \frac{RMSE}{\bar{H}_F} \times 100 \quad (6)$$

gdje su:

H_{PH-i} fotogrametrijski procijenjena srednja sastojinska visina za odsjek i

H_{F-i} terenski procijenjena srednja sastojinska visina za odsjek i

n broj odsjeka

\bar{H}_F aritmetički srednja vrijednost terenski procijenjene srednje sastojinske visine odvojeno po vrstama drveća na cijelom području istraživanja.

3. Rezultati s raspravom – *Results with discussion*

Sukladno očekivanjima, fotogrametrijskom izmjerom zabilježen je za 17 % manji broj stabala u usporedbi sa stvarnim brojem stabala izmjerenim na terenu (tablica 1). Gledano odvojeno po vrstama drveća ukupno za čitavo područje, kao i po uređajnim razredima, najmanje podcjenjivanje broja stabala fotogrametrijske izmjere u odnosu na terensku izmjeru dobiveno je za hrast kitnjak, dok je za običnu bukvu, obični grab i kategoriju »ostalo« dobiveno značajno veće podcjenjivanje broja stabala. Na temelju prijašnjih spoznaja (Næsset 1996, Eid i dr. 2004, Magnusson i dr. 2007) te rezultata vlastitih istraživanja Balenović i dr. (2013, 2015, 2016) navode da je podcjenjivanje stvarnoga broja stabala fotogrametrijskom izmjerom uobičajeno i gotovo neizbježno. Kao glavne razloge navode: nemogućnost interpretacije stabala podstojne etaže, zasjenjena stabla te pogreške pri interpretaciji kada se dva stabla ili više njih interpretiraju kao jedno. Osim toga na iznos podcjenjivanja vizualnom interpretacijom aerosnimaka utječe i niz drugih čimbenika, npr.: kakvoća i svojstva aerosnimaka, uvjeti aerosnimanja, strukturalna obilježja šumskih sastojina, stanišne odnosno topografske karakteristike, metoda interpretacije, iskustvo interpretatora itd.

Odstupanja fotogrametrijski procijenjene srednje sastojinske visine odvojeno po vrstama drveća u odnosu na referentne terenski procijenjene vrijednosti prikazana su u tablici 2. Na temelju prikazanih rezultata vidljivo je da su dobivena vrlo slična odstupanja

Tablica 1. Usporedba fotogrametrijski detektiranoga broja stabala (N_{PH}) s terenski izmjerenim brojem stabala (N_F) po vrstama drveća za uređajne razrede i ukupno. $D_{\%}$ je postotno odstupanje fotogrametrijski detektiranoga broja stabala u odnosu na terenski izmjereni broj stabala

Table 1 Comparison of photogrammetrically detected number of trees (N_{PH}) with field measured number of trees (N_F) by tree species for each forest management class and overall (total). $D_{\%}$ is the percentage difference between photogrammetrically detected number of trees in relation to the field measured number of trees

Vrsta drveća Tree species	Uredajni razred – Forest management class									Ukupno – Total		
	<i>Q. petraea</i>			<i>F. sylvatica</i>			<i>C. hornbeam</i>					
	N_F	N_{PH}	$D_{\%}$	N_F	N_{PH}	$D_{\%}$	N_F	N_{PH}	$D_{\%}$	N_F	N_{PH}	$D_{\%}$
<i>Q. petraea</i>	99	96	–3	60	51	–15	72	66	–8	231	213	–8
<i>F. sylvatica</i>	65	56	–14	951	781	–18	73	60	–18	1089	897	–18
<i>C. betulus</i>	146	114	–22	854	710	–17	554	462	–17	1554	1286	–17
Ostalo – Others	20	15	–25	123	103	–16	118	96	–19	261	214	–18
Ukupno – Total	330	281	–15	1988	1645	–17	817	684	–16	3135	2610	–17

za sve vrste drveća. Ipak, najtočniji rezultati dobiveni su za obični grab, a nešto slabiji za hrast kitnjak, običnu bukvu i kategoriju »ostalo«. Iz grafičkoga prikaza postotnih odstupanja ($D_{\%}$) fotogrametrijski procijenjene srednje sastojinske visine po odsjecima (slika 2) vidljivo je da nešto slabiji rezultati (MD, $MD_{\%}$, RMSE, $RMSE_{\%}$) za kitnjak i bukvu dolaze zbog veće pogreške procjene srednje sastojinske visine u samo jednom odsjeku. Za kitnjak ta pogreška (D) iznosi 5,61 m odnosno 30,26 %, a za bukvu –4,37 m odnosno –23,29. Ako se sastojine s tim maksimalnim odstupanjem izuzmu iz analize, tada se RMSE za bukvu smanjuje s 2,36 m na 1,71 m, odnosno s 10,27 % na 8,47 %. Analogno, RMSE se za kitnjak smanjuje s 2,04 m na 1,89 m, odnosno s 10,16 % na 8,11 %. Razlozi većih odstupanja u tim odsjecima mogu biti posljedica prostornih odstupanja pojedinih fotogrametrijskih ploha u odnosu na terenske plohe uzrokovanih pogreškom GPS-ova prijmnika zbog slabijega prijma signala u gustim sklopljenim sastojinama (Næsset i Gjevestad 2008). Naime, zbog prostornoga odstupanja pojedinih fotogrametrijskih ploha u odnosu na terenske plohe moguće je da su različita stabla bila obuhvaćena fotogrametrijskom izmjerom te da je u slučaju kitnjaka u uzorak ušlo nekoliko izrazito visokih stabala, odnosno u slučaju bukve da nekoliko visokih stabala nije ušlo u fotogrametrijski uzorak. Pogreška DMR-a također je mogući uzrok pogrešne procjene visine pojedinačnih stabala koja potom može dovesti do pogreške u procjeni srednje sastojinske visine. Naime, kako je rasterski DMR rezolucije 1×1 m korišten u ovom istraživanju izrađen interpolacijom mreže točaka međusobno udaljenih 25 m, a područje je istraživanja izražena reljefa, može se pretpostaviti da DMR na određenim dijelovima površine, odnosno na određenim plohamu ne daje u potpunosti točne (stvarne) podatke nadmorske visine tla.

Tako su na određenim plohamu moguće značajnije pogreške (negativne ili pozitivne) pri fotogrametrijskoj izmjeri visine pojedinačnih stabala (Balenić i dr. 2015). Do sličnoga zaključka dolaze Zagalikis i dr. (2005) koji navode kako na točnost fotogrametrijske izmjere visine utječe točnost korištenoga DMR-a.

Nadalje, na temelju dobivenih vrijednosti srednjega odstupanja (MD , $MD_{\%}$) razvidno je da fotogrametrijska srednja sastojinska visina za hrast kitnjak i običnu bukvu u prosjeku neznatno precjenjuje, a za obični grab neznatno podcjenjuje terenske vrijednosti, dok su za kategoriju »ostalo« dobivene veće vrijednosti podcjenjivanja (tablica 2). Potvrda tomu su i grafički prikazi na slici 2. Do precjenjivanja fotogrametrijski srednje sastojinske visine hrasta kitnjaka i obične bukve u većini odsjeka, uz već navedene moguće razloge (pogreška GPS-a, pogreška DMR-a), dolazi i zbog podcjenjivanja broja stabala (tablica 1). Drugim riječima, dio nižih stabala podstojne etaže nisu bila obuhvaćena fotogrametrijskom izmjerom jer ih na aerosnimkama nije moguće detektirati, što u konačnici utječe na precjenjivanje srednje sastojinske visine. Srednja je sastojinska visina za obični grab u polovici odsjeka precijenjena, a u polovici podcijenjena fotogrametrijskom izmjerom, dok je za kategoriju »ostalo« u gotovo svim odsjecima, izuzev u jednom, podcijenjena. Osim već navedenih uzroka (pogreška GPS-a, pogreška DMR-a) učestalije podcjenjivanje kod kategorije »ostalo« može biti uzrokovano i pogrešnom interpretacijom vrha stabla. Naime, zbog izgleda i strukture krošnje, te načina preslikavanja na ICK aerosnimkama za određene vrste drveća (npr. obični grab, obični bagrem, domaće topole) teže je odrediti sam vrh stabala, pa često dolazi do »spuštanja« stereomarkera ispod stvarnoga vrha stabla te time do podcjenjivanja stvarne visine stabla. Također, u obzir treba uzeti i pretpostavke prethodnih

Tablica 2. Odstupanja fotogrametrijski procijenjene srednje sastojinske visine po vrstama drveća u odnosu na referentne terenski procijenjene vrijednosti (D – odstupanje, MD – srednje odstupanje, RMSE – korijen srednje kvadratne pogreške)

Table 2 Differences between photogrammetrically and field estimated mean stand heights (D – difference, MD – mean difference, RMSE – root mean square error)

Vrsta drveća <i>Tree species</i>	D, m		D _% , %		MD, m	MD _% , %	RMSE, m	RMSE _% , %
	Min	Max	Min	Max				
<i>Q. petraea</i>	-3,17	5,61	-13,09	30,26	0,70	3,06	2,36	10,27
<i>F. sylvatica</i>	-4,37	2,67	-23,39	13,25	0,43	2,16	2,04	10,16
<i>C. betulus</i>	-3,23	1,74	-18,32	9,10	-0,37	-1,97	1,54	8,29
Ostalo – <i>Others</i>	-3,49	0,39	-19,04	2,15	-1,40	-7,47	1,85	9,86

istraživanja. Na temelju istraživanja provedenoga na istom području, u kojem su ispitivali točnost srednje sastojinske visine na razini odsjeka (ne po vrstama), Balenović i dr. (2015, 2016) navode da fotogrametrijskom izmjerom podcijenjeni broj stabala nije značajno utjecao na točnost procjene srednje sastojinske visine. Stoga pretpostavljaju da su uzrok podcijenjenja stabala uglavnom pogreške pri interpretaciji kada se dva stabla ili više njih interpretiraju kao jedno, a u manjoj mjeri zasjenjena stabla i stabla podstojne etaže. U prilog tomu ide i činjenica da su istraživane raznodobne sastojine (odsjeci) sastavljene od niza manjih jednodobnih skupina stabala podjednake dobi i dimenzija s manjim udjelom stabala podstojne etaže.

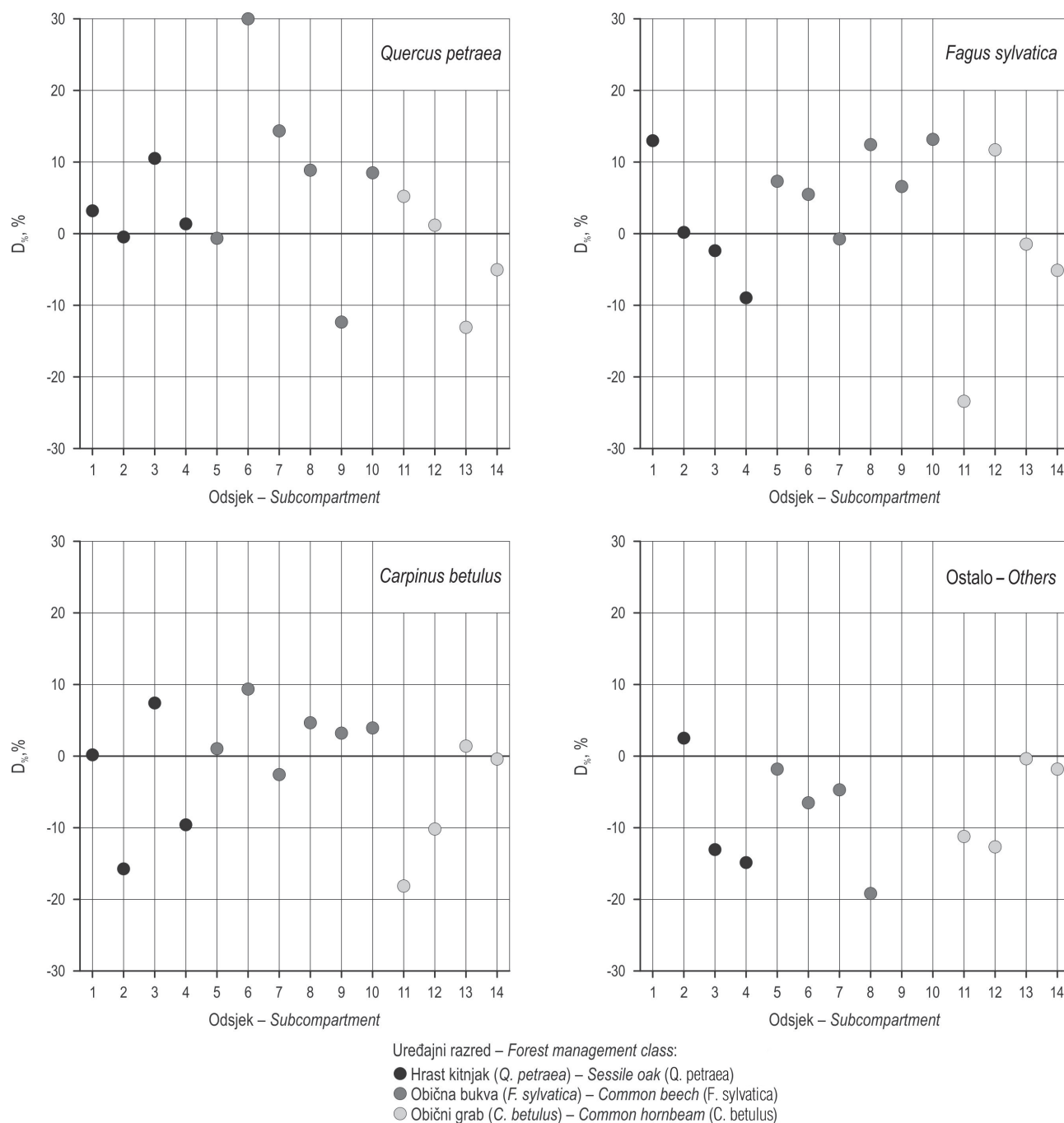
Izravna usporedba s rezultatima prijašnjih istraživanja nije u potpunosti opravdana jer je uglavnom ispitivana točnost procjene visine pojedinačnih stabala (Benko 1993, Shimizu i dr. 2014) ili različite srednje sastojinske visine ukupno (Næsset 1996, Eid i dr. 2004, Magnusson i dr. 2007, Balenović i dr. 2015, 2016), a ne po vrstama drveća. Međutim, ipak je vidljivo da su dobiveni rezultati u skladu s rezultatima dosadašnjih istraživanja. Primjerice, Eid i dr. (2004) fotogrametrijski su procjenjivali dominantnu visinu sastojina u jednodobnim sastojinama četinjača (Norveška) s odstupanjima (D_%) u rasponu od -29 do 26 % u odnosu na terensku izmjeru. U okviru istraživanja koje su Magnusson i dr. (2007) proveli u mješovitim sastojinama četinjača i listača (Švedska) četiri neovisna interpretatora procjenjivali su srednju sastojinsku visinu sa srednjim odstupanjima (MD_%) od -1,6 m, 0,6 m, 1,2 m te 2,1 m u odnosu na referentne terenske podatke. Balenović i dr. (2015) na istom su području istraživanja na kojem je provedeno i ovo istraživanje procjenjivali aritmetički srednju visinu sastojina s odstupanjima (D_%) u rasponu od -10,0 do 11,4 % na aerosnimkama GSD 30 cm te s odstupanjima (D_%) u rasponu od -8,5 do 10,4 % na aerosnimkama GSD 10 cm. Također, pri fotogrametrijskoj procjeni Lorreyeve srednje sastojin-

ske visine Balenović i dr. (2016) dobili su manja odstupanja (D_%), i to za aerosnimke GSD 30 cm u rasponu od -13,6 do 2,8%, a za aerosnimke GSD 10 cm u rasponu od -12,8 do 2,8 %. Iz navedenoga je vidljivo da su odstupanja srednje sastojinske visine po vrstama drveća dobivena u okviru ovoga istraživanja veća od odstupanja srednje visine procijenjene za čitavu sastojinu (Balenović i dr. 2015, 2016). Pozitivne i negativne pogreške procjene pojedinih vrsta u sastojini međusobno se poništavaju, pa se u konačnici dobiva manja pogreška ukupne srednje sastojinske visine.

4. Zaključci – Conclusions

U radu, kojim se nastavljaju dosadašnja istraživanja (Balenović i dr. 2013, 2015, 2016), ispitana je točnost fotogrametrijske procjene srednje sastojinske visine odvojeno po vrstama drveća (hrast kitnjak, obična bukva, obični grab) na brežuljkastom području šumoposjedničkih šuma središnje Hrvatske. U istraživanju su korištene digitalne stereo-aerosnimke prostorne rezolucije GSD 30 cm te digitalni vektorski podaci za izradu DMR-a. Fotogrametrijski materijal jednakih karakteristika dostupan je u Državnoj geodetskoj upravi za cijelo područje Republike Hrvatske. Također, u svim uređenim europskim državama, pa tako i u Hrvatskoj, aerosnimke se redovito prikupljaju u određenim intervalima. Prema tomu, dostupnost redovito ažuriranoga fotogrametrijskoga materijala omogućuje primjenu u radu prikazane metodologije na svim šumskim područjima u Hrvatskoj.

Za sve tri vrste drveća (hrast kitnjak, obična bukva, obični grab) dobivena su vrlo slična odstupanja fotogrametrijski procijenjene srednje sastojinske visine u odnosu na referentne terenske vrijednosti. Ipak, najtočniji rezultati dobiveni su za obični grab, a nešto slabiji za hrast kitnjak i običnu bukvu. Grafičkom je analizom utvrđeno da su nešto slabiji rezultati za kitnjak i bukvu dobiveni zbog veće pogreške procjene



Slika 2. Odstupanje ($D_{\%}$) fotogrametrijski procijenjene srednje sastojinske visine u odnosu na referentne terenski procijenjene vrijednosti
Fig. 2 Differences ($D_{\%}$) between photogrammetrically and field estimated mean stand heights

srednje sastojinske visine u samo jednom odsjeku. Pretpostavka je da su ta veća odstupanja uzrokovana ponajprije pogreškom GPS-ova prijavnika pri određivanju prostornih koordinata središta primjernih ploha tijekom terenskih mjerenja. Zbog pogreške GPS-ova prijavnika dolazi do prostornih odstupanja pojedinih fotogrametrijskih ploha u odnosu na terenske plohe,

pa su različita stabla obuhvaćena terenskom i fotogrametrijskom izmjerom, što u konačnici dovodi do većih odstupanja između terenske i fotogrametrijske izmjere, osobito ako se radi o heterogenim sastojinama. Nadalje, drugi vjerojatni uzrok većih odstupanja čine pogreške DMR-a. Naime, kako je DMR, korišten u ovom istraživanju, izrađen interpolacijom mreže

točaka međusobno udaljenih 25 m, a područje je istraživanja izražena reljefa, može se pretpostaviti da DMR na određenim dijelovima ne daje u potpunosti točne (stvarne) podatke nadmorske visine tla. Zbog toga su na određenim plohama moguće značajnije pogreške (negativne ili pozitivne) pri fotogrametrijskoj izmjeri visine pojedinačnih stabala.

Međutim, unatoč tomu istraživanje je potvrdilo veliku mogućnost primjene digitalnih aerosnimaka visoke prostorne rezolucije u inventuri šuma, odnosno pri procjeni srednje sastojinske visine. S obzirom na navedeno, tijekom daljnjih istraživanja trebalo bi obratiti pozornost na preciznost prikupljanja referentnih terenskih podataka radi što točnijega prostornoga pozicioniranja terenskih ploha, i to npr. primjenom Globalnoga navigacijskoga satelitskoga sustava (GNSS) visoke preciznosti. Tako bi se mogla u potpunosti razlučiti odstupanja koja nastaju kao posljedica same fotogrametrijske izmjere od odstupanja koja nastaju kao posljedica pogreške GPS-ova prijarnika ili DMR-a.

5. Literatura – References

- Balenović, I., A. Seletković, R. Pernar, 2016: Usporedba točnosti procjene strukturnih elemenata sastojina fotogrametrijskom izmjerom aerosnimaka različitih prostornih rezolucija. *Šumarski list* (u tisku).
- Balenović, I., A. Seletković, R. Pernar, A. Jazbec, 2015: Estimation of the mean tree height of forest stands by photogrammetric measurement using digital aerial images of high spatial resolution. *Annals of Forest Research*, 58(1): 125–143.
- Balenović, I., H. Marjanović, K. Indir, D. Vuletić, M. Z. Ostrogović, M. Benko, 2013: Estimation of the stands' arithmetic mean diameter using manual method of digital photogrammetry. *Periodicum Biologorum*, 115(3): 399–407.
- Benko, M., 1993: Procjena taksacijskih elemenata sastojina na infracrvenim kolornim aerosnimkama. *Glasnik za šumske pokuse*, 29: 199–274.
- 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.
- Eid, T., T. Gobakken, E. Næsset, 2004: Comparing stand inventories for large areas based on photo-interpretation and laser scanning by means of cost-plus-loss analyses. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6): 512–523.
- Gruber, M., M. Ponticellia, S. Bernögger, L. Leberl, 2008: Ultracamx, the large format digital aerial camera system by vexcel imaging/Microsoft. *Proceedings of ISPRS XXIIst Congress »Silk Road for Information from Imagery«*. ISPRS, Beijing, China, 17(Part B1): 665–670.
- Korpela, I., 2004: Individual tree measurements by means of digital aerial photogrammetry. *Silva Fennica mon.*, 3: 1–93.
- Magnusson, M., J. E. S. Fransson, H. Olsson, 2007: Aerial photo-interpretation using Z/I DMC images for estimation of forest variables. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 22(3): 254–266.
- Michailoff I., 1943: Zahlenmässiges Verfahren für die Ausführung der Bestandeshöhenkurven. *Cbl. und Thar. Forstl. Jahrbuch*, 6: 273–279.
- Næsset, E., 1996: Determination of number of stems in coniferous forest stands by means of aerial photo-interpretation. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 11(1): 76–84.
- Næsset, E., J. G. Gjevestad, 2008: Performance of GPS precise point positioning under conifer forest canopies. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74(5): 661–668.
- Pernar, R., 1994: Način i pouzdanost određivanja oštećenosti hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.) na infracrvenim kolornim (ICK) aerosnimkama. *Glasnik za šumske pokuse*, 31: 1–34.
- Pernar, R., A. Seletković, M. Ančić, 2007a: Utvrđivanje oštećenosti šuma Spačvanskog bazena primjenom infracrvenih kolornih aerosnimaka. *Šumarski list*, 131(7–8): 315–322.
- Pernar, R., A. Seletković, M. Ančić, M. Vedriš, K. Teslak, 2008: Assessing the health status of beech-fir forests using remote sensing methods. *Periodicum Biologorum*, 110(2): 157–161.
- Pernar, R., M. Ančić, A. Seletković, 2007b: Primjena ICK aerosnimaka za utvrđivanje oštećenosti šuma na području UŠP Gospić. *Šumarski list* 131(11–12): 507–521.
- Pranjić, A., N. Lukić, 1997: Izmjera šuma. Sveučilište u Zagrebu, *Šumarski fakultet*, 1–410.
- Shimizu, K., T. Ota, T. Kajisa, N. Mizoue, S. Yoshida, G. Takao, Y. Hirata, N. Furuya, T. Sano, S. Heng, M. Vuthy, 2014: Estimation of aboveground biomass using manual stereo viewing of digital aerial photographs in tropical seasonal forest. *Land*, 3(4): 1270–1283.
- Van Laar, A., A. Akça, 2007: *Forest mensuration*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 1–376.
- 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.
- Zagalikis, G., A. D. Cameron, D. R. Miller, 2005: The application of digital photogrammetry and image analysis techniques to derive tree and stand characteristics. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(5): 1224–1237.

Abstract

*Photogrammetric Estimation of the Mean Stand Heights Separated
by Tree Species in Mixed Forests of Central Croatia*

The aim of this research was to evaluate the accuracy of photogrammetrically estimated mean tree height for the main tree species (sessile oak, common beech, common hornbeam) of the mixed privately-owned forests in Central Croatia. Within this research, digital aerial images of ground sampling distance of 30 cm and national digital terrain data for digital terrain model (DTM) creation were used. Stereo-photogrammetric measurement was conducted on photogrammetric plots overlaid upon the aerial images based on the spatial coordinates of the plot centres recorded by the GPS receiver during field survey. Photogrammetric heights of each tree on the plot were calculated as a difference of tree top determined on aerial images and corresponding tree bottom obtained from DTM. The accuracy of the photogrammetrically estimated mean tree height of each species was evaluated with reference field data. For that purpose, the photogrammetric and field mean stand heights of the main tree species were calculated for each subcompartment. Mean stand heights were calculated as averages of all measured trees within specific subcompartment.

Very similar errors of photogrammetrically estimated mean stand heights in relation to field estimates were obtained for all three observed species (sessile oak, common beech, common hornbeam). However, the most accurate estimates were obtained for common hornbeam (MD = -1,97%, RMSE_% = 8,29%), whereas slightly lower accuracy was obtained for common beech (MD = 2.16 %, RMSE_% = 10.16 %) and sessile oak (MD = 3.06 %, RMSE_% = 10.27 %). The results of this research confirmed the great potential for the application of digital aerial images of high spatial resolution in forest inventory, especially for the mean tree height estimation.

Keywords: stereo photogrammetry, digital aerial images, tree height, mixed forest stands, forest inventory

Adresa autorâ – Authors' addresses:

Izv. prof. dr. sc. Ante Seletković
e-pošta: aseletkovic@sumfak.hr
Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Zavod za izmjeru i uređivanje šuma
Svetošimunska 25
10 000 Zagreb
HRVATSKA

Marija Perić
e-pošta: marijapericc@gmail.com
Lanište 12B
10 020 Zagreb
HRVATSKA

Dr. sc. Ivan Balenović *
e-pošta: ivanb@sumins.hr
Hrvatski šumarski institut
Zavod za uređivanje šuma i šumarsku ekonomiku
Trnjanska cesta 35
10000 Zagreb
HRVATSKA

* Glavni autor – Corresponding author

Primljeno (Received): 18. 09. 2016.

Prihvaćeno (Accepted): 07. 10. 2016.