

REGRESIJSKI MODELI PROCJENE PRSNIH PROMJERA ZA POTREBE FOTOGRAMETRIJSKE IZMJERE

REGRESSION MODELS OF DBH ESTIMATION FOR PHOTOGRAMMETRIC MEASUREMENT

Ivan BALENOVIĆ^{1*}, Ante SELETKOVIĆ², Renata PERNAR², Maša Zorana OSTROGOVIĆ¹, Anamarija JAZBEC²

Sažetak

Glavni cilj ovoga rada bio je izraditi regresijske modele procjene prsnih promjera glavnih vrsta drveća (hrast kitnjak, obična bukva, obični grab i crna joha) za brežuljkasto područje raznodobnih šumoposjedničkih šuma gospodarske jedinice "Donja Kupčina–Pisarovina" i time stvoriti preduvjete za primjenu fotogrametrijske metode izmjere sastojina primjenom suvremenih alata i tehnika digitalne fotogrametrije. Na temelju spoznaja dosadašnjih istraživanja, te imajući u vidu strukturnu heterogenost predmetnih sastojina, u izgradnji regresijskih modela procjene prsnih promjera koristile su se dvije nezavisne varijable, i to kod prvog modela (d_{M1}) promjer krošnje i visina stabla, te kod drugog modela (d_{M2}) površina projekcije krošnje i visina stabla. Terenska izmjera strukturnih elemenata sastojina (prсни promjer, promjer krošnje, visina stabla) potrebnih za izradu regresijskih modela provedena je na uzorku od 383 stabala: 103 stabla hrasta kitnjaka, 103 stabla obične bukve, 127 stabala običnoga graba i 50 stabala crne joha raspoređenih kroz 6 odabranih odjela (16.–21.) g.j. "Donja Kupčina–Pisarovina".

Provedenom parcijalnom linearnom korelacijom potvrđena je statistička značajnost svih nezavisnih varijabli (promjer krošnje, površina krošnje i visina stabla) planiranih u izgradnji modela. Višestruka regresijska analiza potvrdila je statističku značajnost svih izrađenih modela, dakle za oba tipa modela (d_{M1} i d_{M2}) i sve vrste drveća (hrast kitnjak, obična bukva, obični grab i crna joha). Rezultati modeliranja pokazali su kako u prvom modelu (d_{M1}) nezavisne varijable promjer krošnje i visina stabla, kao i u drugom modelu (d_{M2}) varijable površina projekcije krošnje i visina stabla objašnjavaju varijabilnost prsnog promjera s visokim iznosima koeficijenata determinacije ($R^2 > 0,76$). Usporedbom rezultata po vrstama drveća između pojedinih modela utvrđeno je kako prvi model za vrste kitnjak i bukvu pokazuje bolje rezultate, tj. dobiveni su za 4 % veći iznosi koeficijenata determinacije, te manji iznosi pogreške procjene prsnih promjera iskazanih kroz korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE). Za vrste drveća joha i grab kod oba modela dobiveni su gotovo isti rezultati u pogledu iznosa R^2 i RMSE. S obzirom da kod modela za običnu bukvu (d_{M1}) varijable promjer krošnje i visina stabla ukupno povećavaju objašnjenu varijabilnost prsnog promjera sa svega 3 %, za procjenu prsnog promjera obične bukve preporuča se uporaba jednostavnijeg modela s promjerom krošnje kao jedinom nezavisnom varijablom, posebice ukoliko se tijekom fotogrametrijske izmjere ne mjeri visina stabala.

Na temelju prikazanih rezultata i parametara regresijske analize za svaki pojedini model te rezultata grafičkog i analitičkog testiranja svakog pojedinog modela, može se zaključiti da izrađeni regresijski modeli pružaju mogućnost korištenja za procjenu prsnih promjera metodom fotogrametrijske izmjere u raznodobnim šumoposjedničkim šumama g.j. "Donja Kupčina–Pisarovina", kao i u sastojinama sličnih strukturnih karakteristika. Za potvrdu mogućnosti praktične primjene izrađenih regresijskih analiza, potrebno je provesti fotogrametrijsku izmjeru sastojina g.j. "Donja Kupčina–Pisarovina", te dobivene rezultate, ali i troškove njene primjene, usporediti s terenskim.

KLJUČNE RIJEČI: prсни promjer, promjer krošnje, površina projekcije krošnje, visina stabla, modeliranje, višestruka regresijska analiza

¹ Dr.sc. Ivan Balenović, Maša Zorana Ostrogović, dipl.ing.šum., Hrvatski šumarski institut, Cvjetno naselje 41, HR-10450 Jastrebarsko, Hrvatska

² Doc.dr.sc. Ante Seletković, Prof.dr.sc. Renata Pernar, Prof.dr.sc. Anamarija Jazbec, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Svetošimunska 25, HR-10002 Zagreb, Hrvatska
*ivanb@sumins.hr; tel: +385 (0)1 6311 584

Uvod

Introduction

Budući da na aerosnimkama nije moguće izravno mjeriti prsni promjer stabala, osnovni preduvjet za primjenu fotogrametrijske metode izmjere šumskih sastojina je postojanje pouzdanih modela procjene prsnih promjera. Osnovni parametri u tim modelima su širina krošnje i visina stabla kao nezavisne varijable, a možemo ih odrediti na terenu ili na aerosnimkama (fotogrametrijski). Stoga je proučavanje odnosa i izrada matematičkih modela ovisnosti prsnog promjera i varijabli stabala mjerljivih na aerosnimkama (promjer krošnje, površina krošnje, visina stabla, broj stabala, itd.) bio predmet brojnih istraživanja.

Najraniji, a ujedno i najjednostavniji modeli procjene prsnih promjera uglavnom su bili izrađeni na temelju jedne nezavisne, fotogrametrijski izmjerene varijable – promjera krošnje (Ilvessalo 1950, Minor 1951, Feree 1953, Krajicek i dr. 1961, Jakobsons 1970, Petlewitz 1976, Pernar 1997). Takvi modeli uglavnom pokazuju visoku povezanost prsnog promjera i promjera krošnje za određenu vrstu drveća te određeno geografsko područje. Primjerice, Pernar (1997) je korištenjem jednostavnih linearnih modela ovisnosti terenski izmjerene prsnog promjera o fotogrametrijski izmjerenom promjeru krošnje dobila vrlo jake korelacije, i to za: običnu jelu $r=0,953$; običnu smreku $r=0,980$, te za običnu bukvu $r=0,978$.

Kako bi se smanjio negativan utjecaj nepravilnog oblika krošnje na procjenu prsnog promjera, Aldred i Kippen (1967) na temelju rezultata provedenog istraživanja predlažu primjenu površine krošnje umjesto promjera krošnje. Kušan (1988) uspoređuje jedanaest načina računanja površine projekcije krošnje obične jele aproksimirajući projekciju krošnje krugom ili elipsom. Na temelju dobivenih rezultata, kao najpodesniji način navodi računanje površine projekcije krošnje pomoću formule za površinu elipse na temelju dva međusobno okomita terenski izmjerena promjera krošnje.

Međutim, uz primjenu promjera ili površine krošnje, određena istraživanja (Tomašegović 1961, Talts 1977, Kalliovirta i Tokola 2005) ukazala su na potrebu uključivanja dodatnih nezavisnih varijabli pri modeliranju prsnog promjera, i to ponajprije visine stabla. Tomašegović (1961) tako navodi da "različite visine stabala, uz inače iste okolnosti, kod iste širine krošnje i obratno indiciraju različite stajbinske bonitete, dakle i različite prsne promjere". Kalliovirta i Tokola (2005), te Zagalikis i dr. (2005) ističu kako na odnos prsnog promjera i visine stabla utječe gustoća sastojine. Smatraju kako primjena visine stabla, uz promjer krošnje, može smanjiti ili potpuno anulirati utjecaj gustoće sastojine na pogrešnu procjenu prsnog promjera.

Također, poznato je da na odnos između prsnog promjera, promjera ili površine krošnje te visine stabla pojedine vrste utječe i niz drugih čimbenika, poput položaja stabla u sastojini, omjera smjese, gustoće sastojine, načina gospodarenja, kvalitete staništa, topografije terena, lokaliteta odnosno geografskog područja itd. (Jakobsons 1970, Talts 1977, Korpela 2004, Kalliovirta i Tokola 2005, Maltamo i dr. 2007, Kaitaniemi i Lintunen 2008). Stoga je većina regresijskih modela

uglavnom lokalnog karaktera, tj. izrađeni su za određenu vrstu drveća u određenim sastojinskim prilikama te za određeni lokalitet.

Slijedom prethodno navedenog, glavni cilj ovoga rada je izraditi regresijske modele procjene prsnih promjera glavnih vrsta drveća (hrast kitnjak, obična bukva, obični grab i crna joha) za brežuljkasto područje raznodobnih šumoposjedničkih šuma gospodarske jedinice "Donja Kupčina–Pisarovina" i time stvoriti preduvjete za primjenu fotogrametrijske metode izmjere sastojina primjenom suvremenih alata i tehnika digitalne fotogrametrije, kojom bi se radovi na uređajnoj inventuri šumoposjedničkih šuma mogli značajno ubrzati, a samim time ostvariti uštede u vremenu i novcu. S obzirom na spoznaje prethodno navedenih istraživanja, te imajući u vidu strukturnu heterogenost predmetnih sastojina, višestrukim regresijskom analizom izradit će se dvije grupe, odnosno dva modela, i to: (d_{M1}) s promjerom krošnje i visinom stabla, te (d_{M2}) s površinom projekcije krošnje i visinom stabla kao nezavisnim varijablama. Na temelju dobivenih rezultata utvrdit će se u kojoj mjeri izrađeni modeli objašnjavaju varijabilnost prsnog promjera istraživanih vrsta drveća. Također, dobiveni rezultati poslužit će kao temelj za daljnja istraživanja, tj. za ispitivanje mogućnosti praktične primjene izrađenih modela te usporedbu modela dobivenih na temelju terenske i fotogrametrijske izmjere.

Materijal i metode

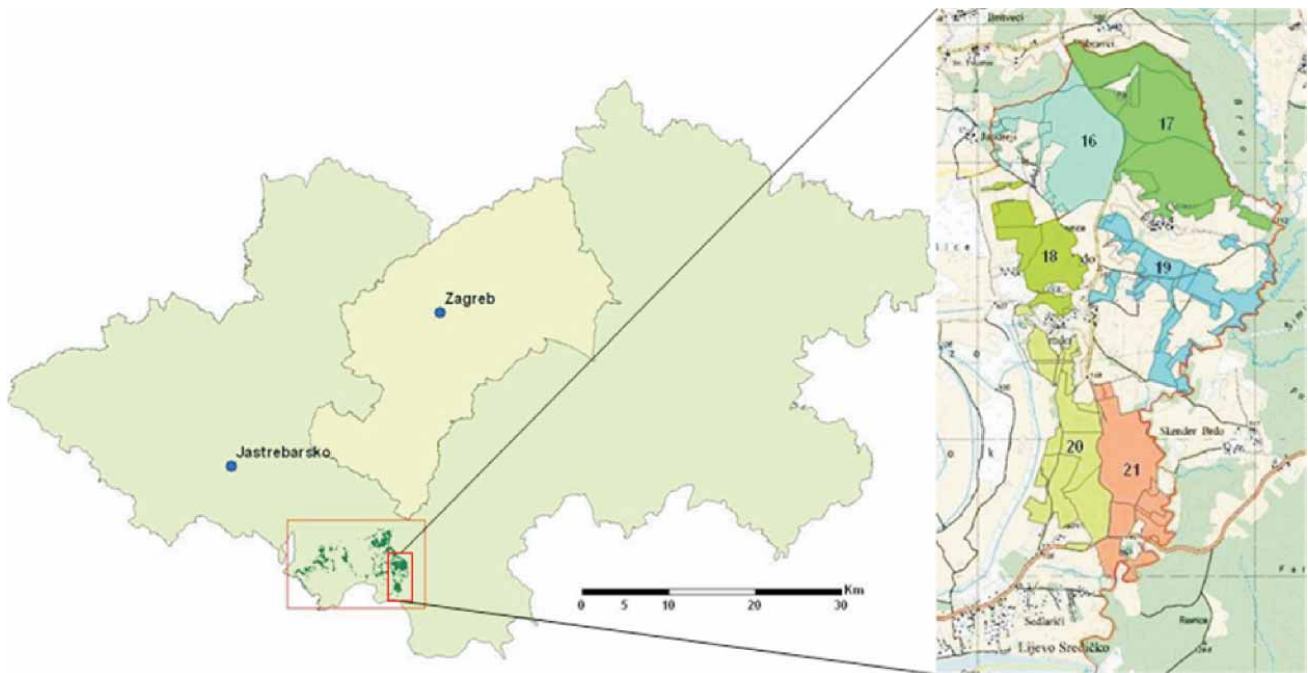
Material and methods

Područje istraživanja na kojemu je provedena terenska izmjera strukturnih elemenata sastojina obuhvaća 6 odabranih odjela (16.–21. odjel) odnosno 24 odsjeka istočnog brežuljkastog dijela raznodobnih šumoposjedničkih šuma g.j. "Donja Kupčina–Pisarovina" približne površine 480 ha (slika 1). Predmet istraživanja predstavljaju glavne vrste drveća navedenog područja: hrast kitnjak (*Quercus petraea* L.), obična bukva (*Fagus sylvatica* L.), obični grab (*Carpinus betulus* L.) i crna joha (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn).

Terenska izmjera strukturnih elemenata sastojina provedena je na 383 stabala, od toga: 103 stabla hrasta kitnjaka, 103 stabla obične bukve, 127 stabala običnoga graba i 50 stabala crne joha raspoređenih kroz cijelo područje istraživanja. Pri tome se pazilo da u uzorku podjednako budu zastupljeni svi debljinski stupnjevi distribucije prsnih promjera.

Stablama u uzorku mjerena su dva međusobno okomita prsna promjera ($d_{1,30-1}$, $d_{1,30-2}$), visina (h), te dva međusobno okomita promjera vidljivog dijela krošnje (D_{max} – maksimalni, D_{min} – minimalni), odnosno dva vertikalno projicirana promjera krošnje na tlo (slika 2). Pod vidljivim dijelom krošnje podrazumijeva se onaj dio krošnje za koji se pretpostavlja da je vidljiv na aerosnimkama. Prema tomu, dio krošnje zasjenjen od strane krošanja susjednih stabala nije mjereno.

Dosadašnjim istraživanjima (Nash 1949, Ilvessalo 1950, Nyysönen 1955, Benko 1993), utvrđeno je kako između terenski i fotogrametrijski izmjerenih dimenzija krošanja (promjera krošnje, površine krošnje) postoje statistički značajna odstu-



Slika 1. Lijevo: Položaj g.j. "Donja Kupčina–Pisarovina" u Zagrebačkoj županiji. Desno: izabrano područje istraživanja (odjeli 16 do 21).
Figure 1 Left: Location of the m.u. "Donja Kupčina–Pisarovina" in Zagreb County. Right: Selected research area (compartments 16 to 21).

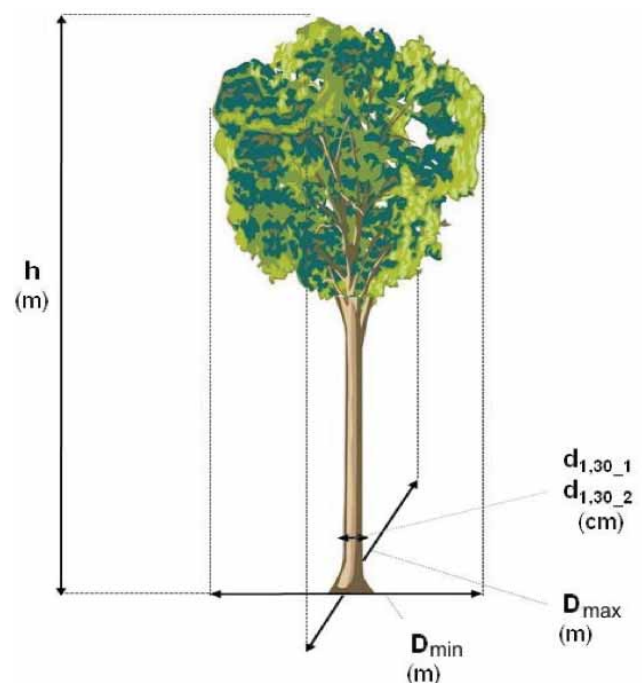
panja. Točnije, uslijed međusobnog preklapanja dijelova krošanja susjednih stabla fotogrametrijskom izmjerom često dolazi do podcjenjivanja promjera ili površine projekcije krošnje u usporedbi s terenskom izmjerom. Zbog toga se za potrebe fotogrametrijske izmjere modeli procjene prsnih promjera najčešće izrađuju na temelju terenski izmjerenog prsnog promjera i fotogrametrijski izmjerenog promjera ili površine projekcije krošnje. Dakle, stablo kojemu je na terenu izmjeren prsni promjer, i GPS prijemnikom snimljen položaj, potrebno je pronaći na aerosnimkama i izmjeriti mu krošnju. Pri tomu su kod pronalaska stabla na aerosnimkama moguće pogreške, jer i najtočniji GPS prijemnici u gustim sklopljenim sastojinama imaju određena odstupanja. Stoga smo se u ovom istraživanju u izgradnji modela procjene prsnih promjera odlučili koristiti terenski izmjerene promjere krošanja, ali na način da smo mjerili samo onaj dio krošnje za koji se pretpostavlja da je vidljiv na aerosnimkama, tzv. vidljivi dio krošnje. Na taj način moguće je utvrditi odstupanja modela procjene prsnih promjera kada koristimo terenske izmjerene promjere krošanja i visine stabala i modela kod kojega koristimo promjere krošanja, površine projekcije krošanja i visine stabala dobivene fotogrametrijskom izmjerom.

Za izmjeru je korištena promjerka od 100 cm s milimetarskom podjelom za izmjeru prsnih promjera, ultrazvučni visinomjer Vertex III za izmjeru visina, te ultrazvučni daljinomjer Vertex III i trasirke za izmjeru projiciranih promjera krošanja na tlo.

Na temelju terenski izmjerenih strukturnih elemenata sastojina izračunate su varijable; prsni promjer ($d_{1,30}$), promjer krošnje (D), površina projekcije krošnje (P), i visina stabla (h) potrebne za izradu regresijskih modela te je formirana baza podataka. Prije same izrade regresijskih modela provedena je

parcijalna linearna korelacija kako bi se utvrdilo da li su sve nezavisne varijable (D , P , h) planirane u izgradnji modela statistički značajne.

Višestrukom linearnom regresijskom analizom izrađena su dva regresijska modela procjene prsnih promjera glavnih vrsta



Slika 2. Prikaz varijabli mjerenih na odabranim stablima (preuzeto i prilagođeno iz Dubravac 2002)

Figure 2 Description of the variables measured on the selected trees (taken and adopted from Dubravac 2002)

drveća. S obzirom da su predmet ovoga istraživanja raznodobne sastojine šumoposjedničkih šuma prilično heterogene strukture, te imajući uvidu spoznaje dosadašnjih istraživanja (Tomašegović 1961, Kalliovirta i Tokola 2005) prema kojima je varijabilnost prsnog promjera najbolje opisana s promjerom krošnje i visinom stabla kao nezavisnim varijablama, u izgradnji prvog tipa regresijskih modela (d_{M1}) procjene prsnih promjera kao nezavisne varijable koristili smo upravo promjer krošnje (D) i visinu stabla (h).

$$(d_{M1}) d_{1,30} = b_0 + b_1 D + b_2 h$$

Kao što je već navedeno, prema pojedinim istraživanjima (Aldred i Kippen 1967) negativan utjecaj nepravilnog oblika krošnje na procjenu prsnog promjera može se smanjiti primjenom varijable površine projekcije krošnje umjesto promjera krošnje. Stoga smo u izgradnji drugog regresijskog modela (d_{M2}) procjene prsnih promjera kao nezavisne varijable koristili površinu projekcije krošnje (P) i visinu stabla (h).

$$(d_{M2}) d_{1,30} = b_0 + b_1 P + b_2 h$$

gdje je:

$d_{1,30}$ – aritmetički srednji prsni promjer iz dva međusobno okomita terenski izmjerena prsna promjera ($d_{1,30-P}$, $d_{1,30-2}$)

b_0 – regresijska konstanta,

b_1 i b_2 – regresijski koeficijenti,

h – terenski izmjerena visina stabla,

D – promjer krošnje izračunat kao aritmetička sredina iz dva terenski izmjerena međusobno okomita promjera vidljivog dijela krošnje (D_{max} – maksimalnog, D_{min} – minimalnog), odnosno dva vertikalno projicirana promjera krošnje na tlo,

P – površina projekcije krošnje izračunata iz dva terenski izmjerena međusobno okomita promjera vidljivog dijela krošnje (D_{max} , D_{min}), odnosno dva vertikalno projicirana promjera krošnje na tlo primjenom formule za površinu elipse.

Analiza valjanosti, odnosno validacija svakog pojedinog modela te usporedba dobivenih rezultata provedena je grafičkim i analitičkim metodama (Kolmogorov-Smirnovljevi test).

Izračun varijabli i dio grafičkih prikaza napravljen je u programskom paketu Excel. Statistička obrada podataka i drugi dio grafičkih prikaza izrađen je u programskom paketu STATISTICA 7.1 (StatSoft Inc. 2011) pri čemu je razina značajnosti od 5 % smatran statistički značajnim.

Rezultati s raspravom

Results with discussion

Provedenom parcijalnom linearnom korelacijom dobiveni su korelacijski koeficijenti prikazani u tablici 1, te je utvrđeno da su sve nezavisne varijable (D , P , h) planirane u izgradnji modela statistički značajne. Iz dobivenih korelacijskih koeficijenata vidljiva je visoka povezanost svake od testiranih potencijalnih nezavisnih varijabli (D , P , h) s prsnim promjerom, i to

Tablica 1. Koeficijenti parcijalne linearne korelacije

Table 1 Partial linear correlation coefficients

Vrsta Species	Varijabla Variable	D	P	h
Hrast kitnjak Sessile oak	$d_{1,30}$	0,82	0,75	0,70
Obična bukva Common beech	$d_{1,30}$	0,94	0,89	0,80
Obični grab Common hornbeam	$d_{1,30}$	0,81	0,77	0,70

za sve promatrane vrste drveća. Time je opravdan odabir nezavisnih varijabli za višestruku linearnu regresijsku analizu.

U tablici 2. prikazani su rezultati višestruke regresijske analize, odnosno parametri izrađenih regresijskih modela (d_{M1}) procjene prsnih promjera s promjerom krošnje (D) i visinom stabla (h) kao nezavisnim varijablama iz kojih je vidljivo da su svi modeli statistički značajni ($p_m < 0,05$). Prema dobivenim koeficijentima determinacije (R^2) pomoću nezavisnih varijabli modela (D i h) objašnjava se 79 % varijabilnosti prsnog promjera običnog graba i crne johe, 80 % varijabilnosti prsnog promjera hrasta kitnjaka, te čak 96 % varijabilnosti prsnog promjera obične bukve. Pogreška procijene prsnih promjera iskazana kroz korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE) najmanja je za model običnog graba (3,24 cm), a najveća za model hrasta kitnjaka (5,01 cm). Procijenjeni parametri nezavisnih varijabli (D , h) također su statistički značajni u svim modelima ($p_v < 0,05$).

Rezultati višestruke linearne regresijske analize za modele (d_{M2}) procjene prsnih promjera s površinom projekcije krošnje (P) i visinom stabla (h) kao nezavisnim varijablama prikazani su u tablici 3. Na temelju parametara izrađenih modela, može se zaključiti da su i u ovom slučaju svi izrađeni modeli statistički značajni ($p < 0,05$). Pomoću nezavisnih varijabli korištenih u modelima (P , h) objašnjava se 79 % varijabilnosti prsnog promjera običnoga graba i crne johe, 76 % varijabilnosti prsnog promjera hrasta kitnjaka te 92 % varijabilnosti prsnog promjera obične bukve. Korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE) najmanji je za model običnog graba (3,28 cm), a najveći za model hrasta kitnjaka (5,62 cm). Procijenjeni parametri nezavisnih varijabli (P , h) također su statistički značajni u svim modelima ($p_v < 0,05$).

Dobiveni koeficijenti determinacije pokazuju kako u prvom modelu (d_{M1}) nezavisne varijable promjer krošnje i visina stabla, kao i u drugom modelu (d_{M2}) varijable površina projekcije krošnje i visina stabla vrlo dobro opisuju varijabilnost prsnog promjera kod svih vrsta drveća. Pri tome su iznosi koeficijentata determinacije manji za 4 % kod modela drugog (d_{M2}) za hrast kitnjak i obična bukva, što je vrlo vjerojatno posljedica posrednog računanja površine projekcije krošnje iz samo dva (međusobno okomita) izmjerena promjera vidljivog dijela krošnje. Prema tome, kod izrazito nepravilnih oblika krošanja uputnije bi bilo računati površinu projekcije krošnje iz većeg broja izmjerenih promjera. Kod običnog graba i crne johe va-

Tablica 2. Parametri regresijskih modela (d_{M1}) procijene prsnih promjera ($d_{1,30}$) s promjerom krošnje (D) i visinom stabla (h) kao nezavisnim varijablama
Table 2 Parameters of regression models (d_{M1}) for dbh estimation with crown diameter (D) and tree height (h) as independent variables

Vrsta <i>Species</i>	N	Model, $d_{1,30} =$ <i>Model, dbh =</i>	R	R ²	SP _m	RMSE (cm)	p _m	Varijabela <i>Variable</i>	SP _v	t	p _v
Hrast kitnjak <i>Sessile oak</i>	103	-6,85 + 2,68·D + 1,13·h	0,90	0,80	5,09	5,01	< 0,01	D	0,21	12,50	< 0,01
								h	0,14	8,31	< 0,01
Obična bukva <i>Common beech</i>	103	-5,02 + 3,49·D + 0,73·h	0,96	0,92	4,16	4,10	< 0,01	D	0,19	18,04	< 0,01
								h	0,12	6,22	< 0,01
Obični grab <i>C. hornbeam</i>	127	-3,80 + 2,82·D + 0,77·h	0,89	0,79	3,28	3,24	< 0,01	D	0,21	13,14	< 0,01
								h	0,09	8,85	< 0,01
Crna joha <i>Black alder</i>	50	-7,98 + 3,19·D + 1,17·h	0,89	0,79	4,13	4,00	< 0,01	D	0,77	4,15	< 0,01
								h	0,20	5,83	< 0,01

rijabilnost prsnog promjera podjednako je dobro objašnjena s oba skupa nezavisnih varijabli. Do istog zaključka dolazi se i ukoliko se usporede iznosi pogreške procijene prsnih promjera pojedinih modela (d_{M1} , d_{M2}) po vrstama drveća iskazane kroz korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE). Za hrast kitnjak, RMSE modela d_{M2} za 0,52 cm je veći od RMSE modela d_{M1} , dok je kod obične bukve RMSE modela d_{M2} veći za 0,79 cm u usporedbi s RMSE modela d_{M1} . Kod običnog graba i crne johe RMSE oba modela su podjednake, tj. neznatno se razlikuju (tek u trećoj decimali).

Usporede li se koeficijenti determinacije između modela pojedinih vrsta, uočljivo je da kod oba modela, najveći koeficijent determinacije imaju modeli obične bukve (tablice 2 i 3). Ovdje se može pretpostaviti da je glavni razlog pravilnija i homogenija struktura bukovih sastojina, u odnosu na sastojine ostalih vrsta drveća, čime je i odnos prsnog promjera i dimenzija krošanja čvršći, što je vidljivo i iz rezultata parcijalne korelacije (tablica 1). Promatraju li se procijenjeni korijeni srednje kvadratne pogreške, vidljivo je da najveći iznos RMSE kod oba modela imaju modeli hrasta kitnjaka, a potom obične bukve. Jedan od razloga je i taj što stabla navedenih vrsta drveća do-

sežu veći raspon prsnih promjera (kitnjak do 60 cm, bukva do 80 cm) pa je i mogućnost pogreške procjene veća. Nasuprot njima, stabla običnog graba i crne johe imaju znatno manji raspon prsnih promjera (grab do 47 cm, joha do 45 cm). Također, uočljivo je da su iznosi RMSE kod svih modela, osim kod hrasta kitnjaka, manji od 5 cm, dok su kod kitnjaka tek neznatno veći od 5 cm.

Visoka povezanost (korelacija) između terenski izmjerenih i modelima procijenjenih prsnih promjera, za sve vrste drveća, te za oba modela (d_{M1} i d_{M2}), vidljiva je i iz grafičkih prikaza na slici 3. Pravci izjednačenja oba modela kod svih vrsta slično su položeni, a kod johe i graba gotovo istovjetno.

Na slici 4 grafički su prikazana odstupanja modelima procijenjenih prsnih promjera u odnosu na terenski izmjerene prsne promjere. Odstupanja su izračunata kao razlika modelom procijenjenih i terenski izmjerenih prsnih promjera i prikazana su za svako pojedinačno stablo korišteno u izgradnji pojedinih modela. Iz prikaza je vidljivo da se najveći dio odstupanja kod svih vrsta nalazi u rasponu od ± 5 cm, dok se značajan dio odstupanja nalazi u rasponu $\pm 2,5$ cm. Navedeno je vidljivo i

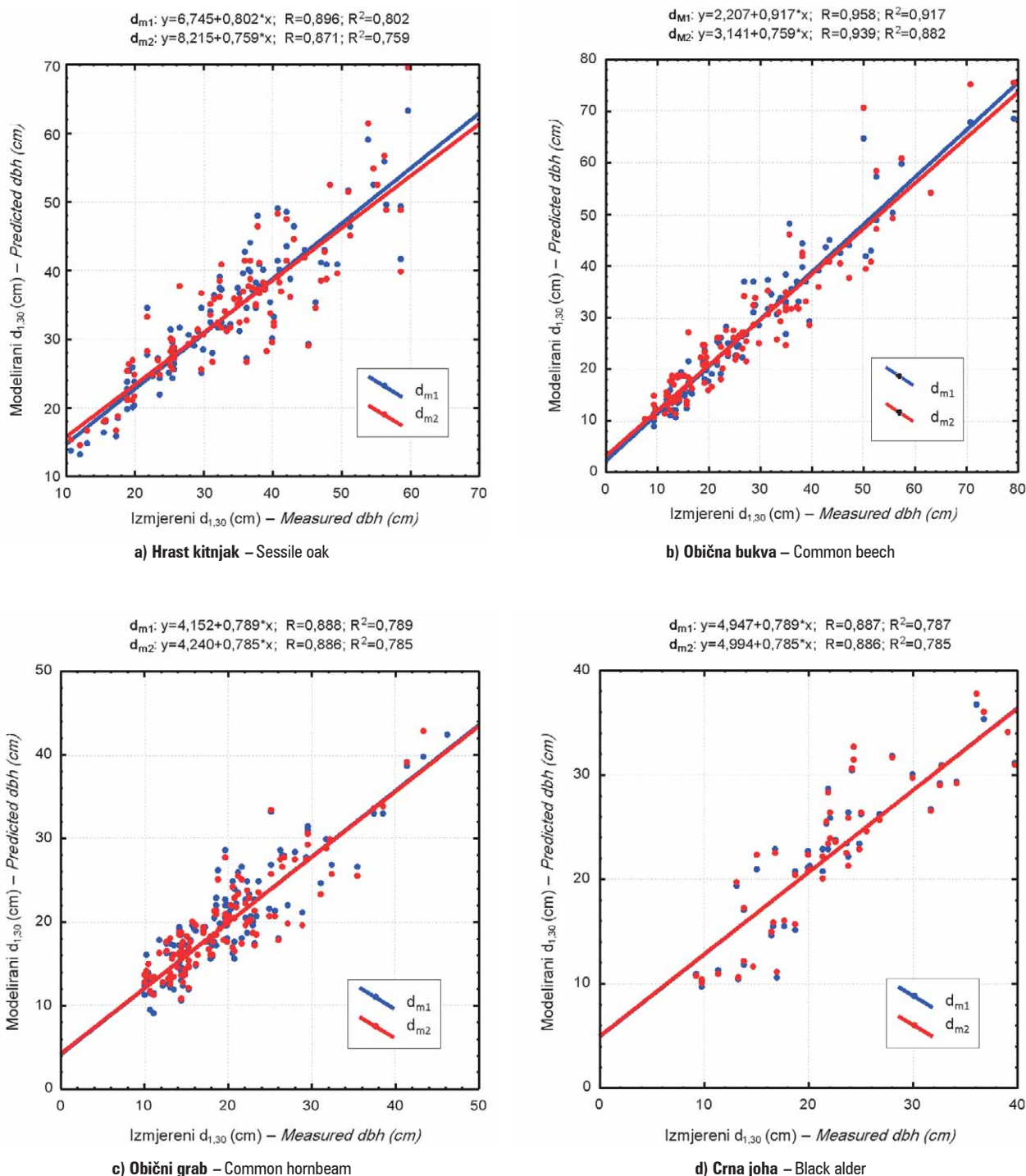
Tablica 3. Parametri regresijskih modela (d_{M2}) procijene prsnih promjera ($d_{1,30}$) s površinom projekcije krošnje (P) i visinom stabla (h) kao nezavisnim varijablama

Table 3 Parameters of regression models (d_{M2}) for dbh estimation with projection of crown area (P) and tree height (h) as independent variables

Vrsta <i>Species</i>	N	Model, $d_{1,30} =$ <i>Model, dbh =</i>	R	R ²	SP _m	RMSE (cm)	p _m	Varijabela <i>Variable</i>	SP _v	t	p _v
Hrast kitnjak <i>Sessile oak</i>	103	-3,87 + 0,23·P + 1,33·h	0,87	0,76	5,62	5,53	< 0,01	P	0,02	10,50	< 0,01
								h	0,14	9,20	< 0,01
Obična bukva <i>Common beech</i>	103	-3,90 + 0,27·D + 1,13·h	0,94	0,88	4,96	4,89	< 0,01	P	0,02	14,11	< 0,01
								h	0,12	9,01	< 0,01
Obični grab <i>C. hornbeam</i>	127	-1,04 + 0,88·D + 0,40·h	0,89	0,79	3,32	3,28	< 0,01	P	0,03	12,91	< 0,01
								h	0,08	10,38	< 0,01
Crna joha <i>Black alder</i>	50	-5,81 + 1,28·D + 0,63·h	0,89	0,79	4,15	4,02	< 0,01	P	0,16	4,07	< 0,01
								h	0,18	6,92	< 0,01

N – broj stabala, SP_m – standardna pogreška procijene modela, p_m – signifikantnost modela, SP_v – standardna pogreška procijene varijabli, t – t-vrijednost, p_v – signifikantnost varijable

N – number of trees, SP_m – standard error of estimate of model, p_m – significance of model, SP_v – standard error of estimate of variable, t – t-value, p_v – significance of variable

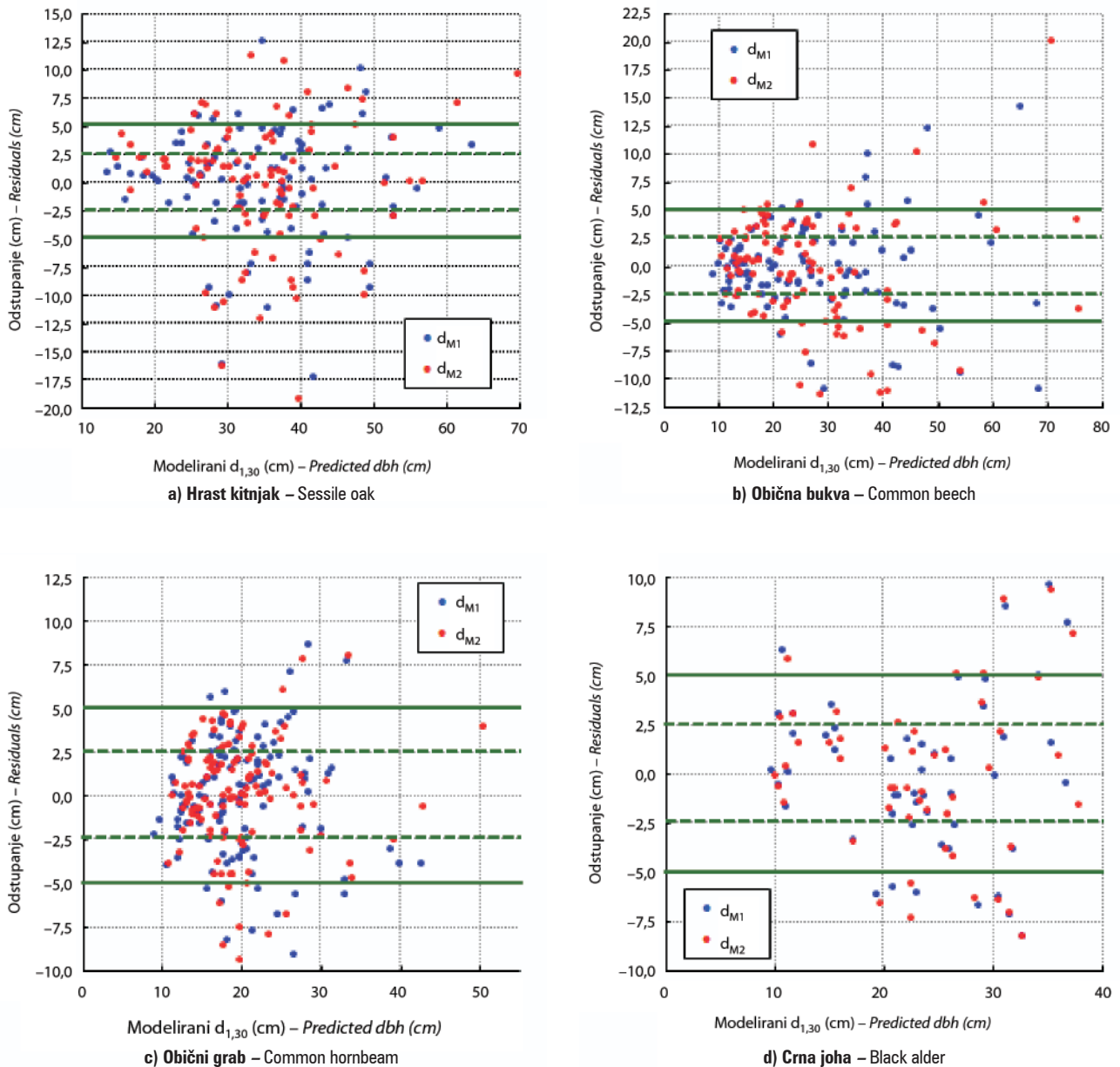


Slika 3. Odnosi terenski izmjerenih i modelom procijenjenih prsnih promjera prikazani po vrstama drveća za oba modela (d_{M1} – model s D i h kao nezavisnim varijablama; d_{M2} – model s P i h kao nezavisnim varijablama)

Figure 3 Relationships between measured and predicted (modeled) values of dbh shown by tree species for both models (d_{M1} – model with D and h as independent variables; d_{M2} – model with D and h as independent variables)

iz tablice 3, koja prikazuje postotna odstupanja modelima procijenjenih prsnih promjera od terenski izmjerenih prsnih promjera za raspone $\pm 5,0$ cm i $\pm 2,5$ cm. U rasponu od ± 5 cm nalazi se 69,90 %–90,63 % odstupanja, dok se u granicama od $\pm 2,5$ cm, dakle u rasponu od 5 cm, što je jednako širini jednog debljinskog stupnja, nalazi 35,92 %–60,16 % svih odstupanja ovisno o modelu i vrsti drveća.

Iz histograma odstupanja modelima procijenjenih prsnih promjera (d_{M1} i d_{M2}) u odnosu na terenski izmjerene prsne promjere prikazanim na slici 5, vidljivo je kako su odstupanja za oba modela kod svih vrsta drveća normalno distribuirana, što je potvrđeno i Kolmogorov-Smirnovljevim testovima ($p > 0,05$).

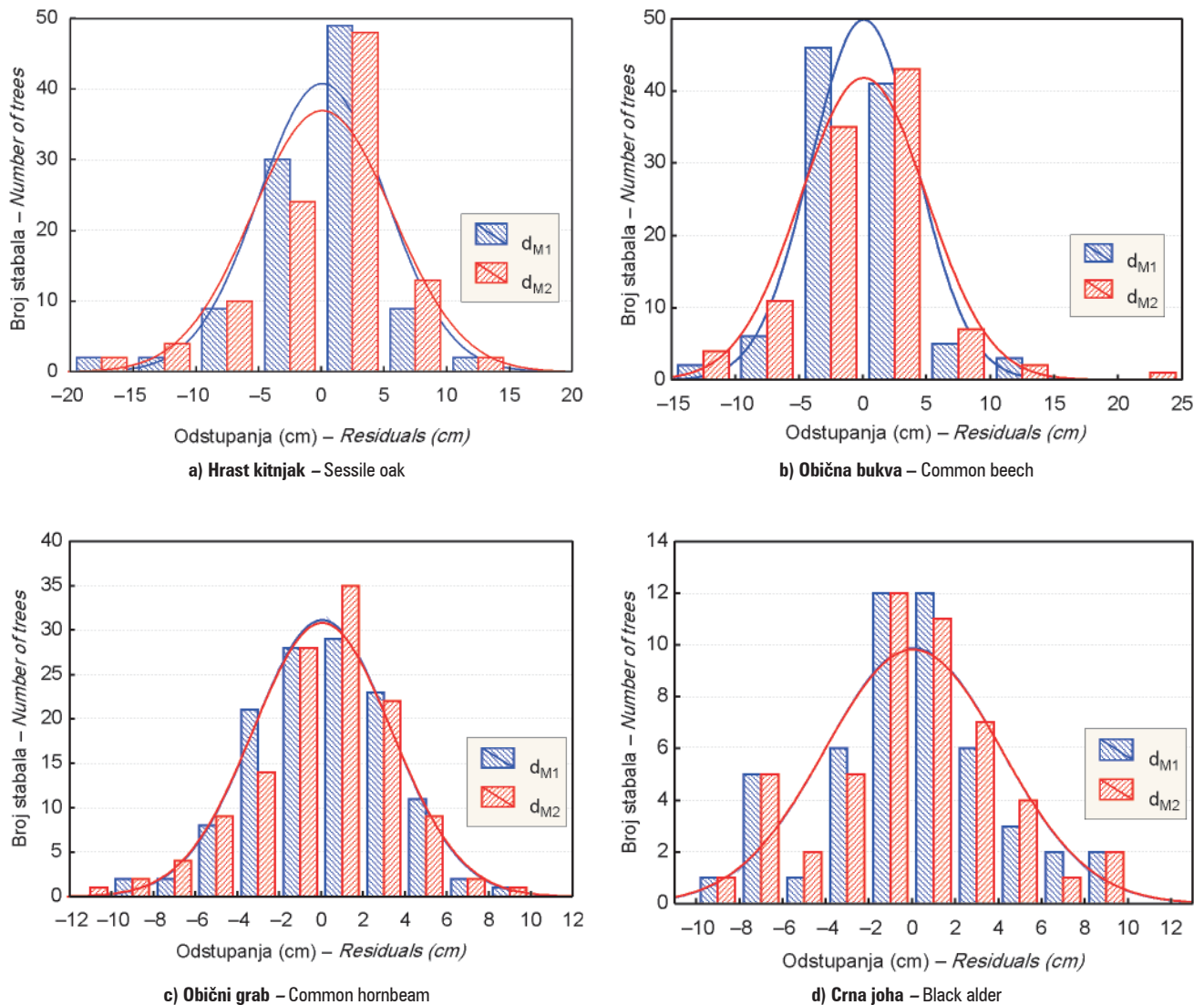


Slika 4. Odstupanja s obzirom na vrijednosti dobivene modelom prikazana po vrstama drveća za oba modela (d_{M1} – model s D i h kao nezavisnim varijablama; d_{M2} – model s P i h kao nezavisnim varijablama). Zelenom linijom označene su granice odstupanja ± 5 cm, a zelenom isprekidanom linijom granice odstupanja $\pm 2,5$ cm.

Figure 4 Residuals related to the values obtained by the model and shown by tree species for both models (d_{M1} – model with D and h as independent variables; d_{M2} – model with P and h as independent variables). Green line denotes residuals within ± 5 cm, and green dotted line denotes residuals within $\pm 2,5$ cm.

Tablica 4. Postotna odstupanja modelima procijenjenih prsnih promjera u odnosu na terenski izmjerene prsne promjere u rasponima $\pm 5,0$ cm i $\pm 2,5$ cm.
Table 4 Residuals percentage of predicted (modelled) dbh in relation to measured dbh in $\pm 5,0$ cm and $\pm 2,5$ cm ranges

Raspon odstupanja Range of residuals	Hrast kitnjak <i>Sessile oak</i>		Obična bukva <i>Common beech</i>		Obični grab <i>Common hornbeam</i>		Crna joha <i>Black alder</i>	
	d_{M1}	d_{M2}	d_{M1}	d_{M2}	d_{M1}	d_{M2}	d_{M1}	d_{M2}
cm	%							
$\pm 5,0$	76,70	69,90	84,47	75,73	88,28	90,63	76,00	74,00
$\pm 2,5$	46,60	44,66	58,25	35,92	59,38	60,16	52,00	54,00



Slika 5. Histogram odstupanja prsnih promjera procijenjenih modelima u odnosu na terenski izmjerene vrijednosti. Odstupanja su prikazana po vrstama drveća za oba modela (d_{M1} – model s D i h kao nezavisnim varijablama; d_{M2} – model s P i h kao nezavisnim varijablama).

Figure 5 Histogram of residuals for predicted (modeled) dbh values in relation to terrestrial measured values. Residuals are shown by tree species for both models (d_{M1} – model with D and h as independent variables; d_{M2} – model with P and h as independent variables).

Provedenom parcijalnom korelacijom utvrđeno je da su se sve nezavisne varijable planirane u izgradnji modela statistički značajne. Također, iz rezultata parcijalne linearne korelacije vidljivo je da je već s varijablama promjera krošnje odnosno površine krošnje objašnjen velik dio varijabilnosti prsnog promjera kod svih vrsta drveća. Stoga se postavlja pitanje u kojoj mjeri uključivanje varijable visine stabla poboljšava model i da li je uključivanje opravdano. Ukoliko se promatra razlika između koeficijenata determinacije izrađenih modela (tablice 2 i 3) i koeficijenata determinacije parcijalne korelacije za varijable promjera krošnje ili površine projekcije krošnje (izračunatih iz koeficijenata korelacija, tablica 1), može se vidjeti u kojoj mjeri uključivanje varijable visine stabla "poboljšava" pojedini model. Kod prvog modela (d_{M1}) visina stabla poboljšava model kitnjaka i graba, odnosno dodatno objašnjava 13 % varijabilnosti prsnog promjera, a kod joha 16 % varijabilnosti. Najmanji utjecaj varijabla visine stabla ima kod modela obične

bukve, gdje dodatno objašnjava samo 3 % varijabilnosti prsnog promjera. Kod drugog modela (d_{M2}) visina stabla ima značajniji utjecaj na "poboljšanje" modela, pa kod hrasta kitnjaka dodatno objašnjava 20 %, kod obične bukve 9 %, kod običnog graba 19 % te kod crne joha 22 % varijabilnosti prsnog promjera. S obzirom na dobivene rezultate, može se zaključiti kako je uključivanje varijable visine stabla opravdano kod oba modela i za modele svih vrsta drveća, osim za model d_{M1} obične bukve. Prema tomu, za procjenu prsnog promjera obične bukve moguće je koristiti regresijski model sa samo jednom nezavisnom varijablom – promjerom krošnje.

Rezultati dobiveni u ovome radu u skladu su sa spoznajama Tomašegovića (1961), te Kalliovorte i Tokole (2005) prema kojima nezavisne varijable promjer ili površina krošnje te visina stabla objašnjavaju varijabilnost prsnog promjera s visokim iznosima koeficijenata determinacije ($R^2 > 0,76$). Međutim, detaljnija us-

poredba s rezultatima dosadašnjih istraživanja nije u potpunosti opravdana iz razloga što je većina postojećih modela procjene prsnih promjera izrađena za crnogorične vrste drveća (Ilvessalo 1950, Tomašegović 1961, Jakobsons 1970, Kallioivorta i Tokola 2005 i dr.). Također većina dosadašnjih istraživanja provedena je u gospodarenim sastojinama, dakle u sastojinama intenzivnog gospodarenja i pravilne strukture. Stoga ovo istraživanje, provedeno u raznodobnim šumoposjedničkim sastojinama heterogene strukture u kojima su tijekom prošlosti izostajali pravilni i pravovremeni gospodarski zahvati, predstavlja svojevrsan doprinos dosadašnjim spoznajama.

Regresijski modeli procjene prsnog promjera primjenu mogu naći ponajprije u šumskim sastojinama manje intenzivnog gospodarenja poput zaštitnih šuma, šuma posebne namjene ili šumoposjedničkih šuma. Upravo se šumoposjedničke šume u Hrvatskoj u posljednjih pet godina intenzivno uređuju, odnosno izrađuju se programi gospodarenja. Za većinu privatnih šuma to je prvo uređivanje, dio površina privatnih šuma je zapušten, nepristupačan ili teško prohodan, a česta je usitnjenost i razbacanost površina (katastarskih čestica šumoposjednika). Sve navedeno značajno otežava terenski rad, tj. povećava troškove i vrijeme potrebno za obavljanje terenskih radova (Balenović i dr. 2010). S druge strane, intenzitet gospodarenja i provođenje propisa zadanih programima gospodarenja u šumoposjedničkim šumama vrlo je upitna. Zbog toga je upitna i svrhovitost tako prikupljenih podataka. Božić i Čavlović (2011) u svom istraživanju navode kako je pri gospodarenju šumoposjedničkim šumama potrebno voditi računa o troškovima prikupljanja i uporabnoj vrijednosti informacija. Prema njihovim tvrdnjama, korisnost ili uporabna vrijednost informacija u uvjetima očekivanog slabog izvršenja plana gospodarenja bit će ostvarena uz pristup manje intenzivne izmjere šuma. Stoga je potrebno istražiti i mogućnosti primjene alternativnih metoda uređivanja privatnih šuma kojima bi se ostvarile određene uštede u vremenu i novcu. Tu se ponajprije misli na primjenu metoda fotogrametrijske izmjere, koja u pojedinim zemljama (npr. Švedska, Norveška) već ima praktičnu primjenu (Magnusson i dr. 2007, Næset 2002). Jednu od potencijalnih metoda primjene, koja podrazumijeva primjenu digitalnih aerosnimaka visokih prostornih rezolucija, digitalnog modela reljefa i digitalnog modela visina, te digitalne fotogrametrijske stanice prikazali su u svom radu Balenović i dr. (2011).

Kako bi se ispitala praktična funkcionalnost u ovome radu izrađenih modela potrebno je provesti fotogrametrijsku izmjeru sastojina g.j. "Donja Kupčina–Pisarovina" te dobivene rezultate, ali i troškove njene primjene usporediti s terenskima. Na taj će se način utvrditi da li i u kojoj mjeri fotogrametrijska izmjera može nadomjestiti terensku izmjeru sastojina.

Zaključci Conclusions

Na temelju spoznaja dosadašnjih istraživanja, te imajući u vidu strukturnu heterogenost predmetnih sastojina, u izgradnji regresijskih modela procjene prsnih promjera za potrebe foto-

grametrijske izmjere koristile su se dvije nezavisne varijable, i to kod prvog modela (d_{M1}) nezavisne varijable promjer krošnje i visina stabla, te kod drugog modela (d_{M2}) površina krošnje i visina stabla.

Prije samog modeliranja (višestruke regresijske analize), provedena je parcijalna linearna korelacija kojom je potvrđena statistička značajnost svih nezavisnih varijabli (promjer krošnje, površina krošnje i visina stabla) planiranih u izgradnji modela.

Provedena višestruka regresijska analiza potvrdila je statističku značajnost svih izrađenih modela, dakle za oba modela (d_{M1} i d_{M2}) i sve vrste drveća (hrast kitnjak, obična bukva, obični grab i crna joha). Rezultati modeliranja pokazali su kako u prvom modelu (d_{M1}) nezavisne varijable promjer krošnje i visina stabla, kao i u drugom modelu (d_{M2}) varijable površina projekcije krošnje i visina stabla objašnjavaju varijabilnost prsnog promjera s visokim iznosima koeficijenata determinacije ($R^2 > 0,76$). Usporedbom rezultata po vrstama drveća između pojedinih modela utvrđeno je kako prvi model za kitnjak i bukvu pokazuje bolje rezultate, tj. dobiveni su za 4 % veći iznosi koeficijenata determinacije, te manji iznosi pogreške procjene prsnih promjera iskazanih kroz korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE). Za johanu i grab kod oba modela dobiveni su gotovo istovjetni rezultati u pogledu iznosa R^2 i RMSE.

S obzirom da kod modela obične bukve (d_{M1}) varijable promjer krošnje i visina stabla ukupno povećavaju objašnjenu varijabilnost prsnog promjera sa svega 3 %, za procjenu prsnog promjera obične bukve preporuča se uporaba jednostavnijeg modela s promjerom krošnje kao jedinom nezavisnom varijablom, posebice ukoliko se tijekom fotogrametrijske izmjere ne mjeri visina stabala.

Na temelju prikazanih rezultata i parametara regresijske analize za svaki pojedini model, te rezultata grafičkog i analitičkog testiranja svakog pojedinog modela, može se zaključiti da izrađeni regresijski modeli pružaju mogućnost korištenja za procjenu prsnih promjera metodom fotogrametrijske izmjere u raznodobnim šumoposjedničkim šumama g.j. "Donja Kupčina–Pisarovina", kao i u sastojinama sličnih strukturnih karakteristika. Za potvrdu mogućnosti praktične primjene izrađenih regresijskih modela potrebno je provesti fotogrametrijsku izmjeru sastojina g.j. "Donja Kupčina–Pisarovina" te dobivene rezultate, ali i troškove njene primjene, usporediti s terenskima.

Literatura References

- Aldred, A. H., F. W. Kippen, 1967: Plot volumes from large-scale 70-mm air photographs. *For. Sci.* 13: 419–427.
- Balenović, I., A. Seletković, R. Pernar, H. Marjanović, D. Vuletić, E. Paladinić, J. Kolić, M. Benko, 2011: Digital Photogrammetry – State of the Art and Potential for Application in Forest Management – Croatia. *SEEFOR*, 2 (2): u tisku.
- Balenović, I., H. Marjanović, M. Benko, 2010: Primjena aerosnimaka u uređivanju šuma u Hrvatskoj. *Šum. list*, 134 (11–12): 623–631.

- Benko, M., 1993: Procjena taksacijskih elemenata sastojina na infracrvenim kolornim aerosnimkama. Glas. šum. pokuse, 29: 199–274.
- Božić, M., J. Čavlović, 2011: Istraživanje i izrada modela uređivanja šuma u šumama šumoposjednika. Završno izvješće projekta za Šumarsku savjetodavnu službu, 188 str., Zagreb.
- Dubravac, T., 2002: Zakonitosti razvoja strukture krošanja hrasta lužnjaka i običnoga graba ovisno o prsnom promjeru i dobi u zajednici *Carpino betuli-Quercetum roboris* Anić em Rauš 1969. Disertacija, 196 str., Šumarski fakultet Zagreb.
- Feree, M. J., 1953: Estimating timber volumes on aerial photographs. Technical Publications NY State College of Forestry.
- Ilvessalo, Y. 1950: On the correlation between crown diameter and the stem of trees. Commun. Inst. Forest. Fenn., 38 (2): 1–26.
- Jakobsons, A., 1970: Sambandet mellan trädkronans diameter och andra träd faktorer, främst brösthöjdsdiametern: analyser grundade på riksskogstaxeringens provträds material (The relationship between crown diameter and other tree factors, diameter at breast height in particular: Analysis based on the sample tree material of the National Forest Inventory). Stockholms skoghögsskolan, institutionen för skogstaxering, Rapport och uppsatser, 14, 75 str., Stockholm.
- Kaitaniemi, P., A. Lintunen, 2008: Precision of allometric scaling equations for trees can be improved by including the effect of ecological interactions. Trees, 22: 579–584.
- Kalliovirta, J., T. Tokola, 2005: Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information. Silva Fenn., 39 (2): 227–248.
- Korpela, I., 2004: Individual tree measurements by means of digital aerial photogrammetry. Silva Fenn. monogr., 3: 1–93.
- Krajčec, J. E., K. A. Brinkman, S. F. Gingrich, 1961: Crown competition – A measure of density. For. Sci. 7 (1): 35–42.
- Kušan V., 1988: Točnost određivanja površine projekcije krošnje obične jele (*Abies alba* L.). Šum. list, 112 (11–12): 489–486.
- Magnusson, M., J.E.S. Fransson, H. Olsson, 2007: Aerial photo-interpretation using Z/I DMC images for estimation of forest variables. Scand. J. Forest Res., 22 (3): 254–266.
- Maltamo, M., P. Packalén, J. Peuhkurinen, A. Suvanto, A. Pesonen, J. Hyyppä, 2007: Experiences and possibilities of ALS based forest inventory in Finland. U: P. Rönnholm, H. Hyyppä, J. Hyyppä (ur.). Proceedings of ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, September 12–14, 2007, Espoo, Finland, IAPRS Vol. XXXVI, Part 3 / W52, 270–279.
- Minor, C. O., 1951: Stem-crown diameter relationships in southern pine. Journal Forestry 49: 490–493.
- Næsset, E., 2002: Determination of mean tree height of forest stands by means of digital photogrammetry. Scand. J. Forest Res., 17 (5): 446–459.
- Nash, A. J., 1949: Some tests on the determination of tree heights from air photographs. Forest Chron., 25: 243–249.
- Nyssönen, A., 1955: On the estimation of the growing stock from aerial photographs. Commun. Inst. Forest. Fenn., 46 (1): 1–57.
- Pernar, R., 1997: Application of results of aerial photograph interpretation and geographical information system for planning in forestry. Glas. šum. pokuse, 34: 141–149.
- Petlewitz, W. H. Frommhold, 1976: Bestimmung der forstlichen Bestandeshöhe aus Luftbildern. Jenaer Rundschau, 21 (2, 5): 71–73.
- StatSoft, Inc., 2011: Statistica, Electronic Statistics Textbook (Electronic Version). Dostupno na: <http://www.statsoft.com/textbook/> (15.11.2010.)
- Talts, J., 1977: Mätning i storskaliga flygbilder för beståndsdatainsamling (Photogrammetric measurements for stand cruising). Royal College of Forestry, Department of Forest mensuration and management, Research notes 6, 102 str., Stockholm.
- Tomašegović, Z., 1961: Ovisnost promjera $d_{1,3}$ jele i smreke o krošnji i visini stabala. Šum. list, 85 (7–8): 254–261.
- Zagalikis, G., A.D. Cameron, D.R. Miller, 2005: The application of digital Photogrammetry and image analysis techniques to derive tree and stand characteristics. Can. J. Forest Res., 35 (5): 1224–1237.

Summary

Since it is impossible to measure diameters at breast height (dbh) directly from aerial photographs, existence of reliable dbh estimation models is crucial for the application of photogrammetric method in forest stands measurements. Research of relationships and creation of mathematic models for correlations between diameter at breast height and tree variables measured on aerial photographs (crown diameter, tree height, tree number etc.) was therefore the object of numerous scientific studies.

Main goal of this paper was to create the regression models for main tree species (Sessile oak, Common beech, European hornbeam and Black alder) dbh estimation in "Donja Kupčina–Pisarovina" forest management unit of uneven-aged, privately owned, forests located at hilly regions (Figure 1). These models would serve as a prerequisite for the application of photogrammetric method in forest stands measurements, by using contemporary tools and digital photogrammetry techniques. Based on the former studies, and keeping in mind the heterogeneous structure of the researched stands, in dbh modelling were used two independent variables. First model (d_{M1}) used crown diameter and tree height, while second model (d_{M2}) used crown projection area and tree height for the above mentioned variables. Field measurements of stands' structural elements (diameter at breast height, crown diameter and tree height (Figure 2)) needed for creating regression models was conducted on the sample of 383 trees in total (103 Sessile oak trees, 103 Common beech trees, 127 European hornbeam trees and 50 Black alder trees), distributed through 6 chosen compartments (16 to 21) at "Donja Kupčina–Pisarovina" forest management unit (Figure 1).

Conducted partial correlation confirmed the statistical significance of all independent variables (crown diameter, crown area and tree height) planned for model creation (Table 1). Multiple regression analysis confirmed the statistical significance of all created models – both model types (d_{M1} – Table 2 and d_{M2} – Table 3) and all tree species (Sessile oak, Common beech, European hornbeam and Black alder). Modelling results have shown that independent variables crown diameter and tree height from the first model (d_M – Table 2), as well as the crown projection area and tree height from the second model (d_M – Table 3) explain the variability of diameter at breast height with high values of determination coefficients ($R^2 > 0,76$). By comparing the results based on tree species between different model types, it was determined that the first model for Sessile oak and Common beech shows better results – 4% higher values of determination coefficient, and lesser error values in dbh estimation, expressed through root mean square error (RMSE), were obtained. For European hornbeam and Black alder both models produced almost identical results regarding R^2 and RMSE values. Since crown diameter and tree height variables in Common beech model (d_{M1}) increase the explained dbh variability by only 3%, using the simpler model with crown diameter as the only independent variable is recommended for estimating Common beech diameter at breast height, especially if tree height is not measured during the photogrammetric measuring.

Based on the obtained results and regression analysis parameters for each individual model (Table 2 and 3), as well as the results from graphic (Figure 3 to 5) and analytic (Kolmogorov-Smirnov test) testing of each individual model, we can conclude that created regression models can be used for dbh estimation in "Donja Kupčina–Pisarovina" forest management unit of uneven-aged, privately owned forests located at hilly regions, and also in forest stands with similar characteristics. In order to confirm the possibility of practical application for created regression models it is necessary to conduct a photogrammetric measurement of forest stands in "Donja Kupčina–Pisarovina" forest management unit, and to compare the obtained results and the costs of its application to terrestrial measurements.

KEYWORDS: diameter at breast height, crown diameter, crown projection area, tree height, modelling, multiple regression analysis