

# Procjena strukturnih elemenata sastojine na temelju vrijednosti spektralnoga odbijanja satelitskoga snimka IKONOS

Ante Seletković, Renata Pernar, Mario Ančić, Jelena Sučić

## Nacrtač – Abstract

Ovim se radom žele istražiti odnosi između spektralnoga odbijanja zabilježenoga na satelitskom snimku IKONOS spačvanskoga područja visoke prostorne rezolucije i pojedine sastojinske veličine, a samim tim i regresijski modeli za procjenu sastojinskih veličina.

Za svaki je odsjek očitana sa satelitskoga snimka srednja vrijednost spektralnoga odbijanja unutar četiri kanala. Kanoničkom korelacijskom analizom ispitana je povezanost između linearne kombinacije vrijednosti kanala i linearne kombinacije vrijednosti terenskih podataka za svako obilježje posebno (broj stabala, prsni promjer, visina, temeljnica i volumen). Povezanost između aritmetičkih sredina vrijednosti spektralnih odbijanja po kanalima i varijabli procijenjena je Pearsonovom korelacijom. Za svaku sastojinsku veličinu procijenjena su dva regresijska modela unutar uređajnoga razreda hrasta lužnjaka i to za svaki dojni razred posebno.

Iz rezultata kanoničke korelacijske analize možemo zaključiti da su promatrane varijable u dobroj korelaciji sa sva 4 kanala. Što se tiče mogućnosti procjena sastojinskih veličina na satelitskim snimcima, najboljima su se pokazali rezultati regresijskih modela za treći dojni razred te za drugi i peti dojni razred. Također rezultati ovih istraživanja pokazali su da u šestom i sedmom dobnom razredu nije opravdano procjenjivati sastojinske veličine za sve promatrane varijable zbog niskih vrijednosti koeficijenata determinacije. Kako su se za procjenu strukturnih elemenata sastojine koristili podaci bazirani na spektralnim informacijama iz piksela, mogući razlog lošijih rezultata procjene sastojinskih veličina za šesti i sedmi dojni razred leži i u visokoj prostornoj rezoluciji satelitskoga snimka IKONOS, na kojem se nerijetko pokazuju izolirani pikseli (klasificirani kao klasa), umetnuti u područje koje predstavlja drugu klasu, što otežava i daljnju analizu i upotrebu satelitskoga snimka.

*Ključne riječi:* IKONOS, spektralno odbijanje, regresijski modeli, procjena sastojinske veličine

## 1. Uvod – Introduction

Zbog brzoga razvitka tehnologije u drugoj polovici XX. stoljeća dogodile su se velike promjene u načinu prikupljanja podataka, osobito u razvijenijim zemljama (Kalafadžić i Kušan 1991). Osim uobičajenih terestričkih načina prikupljanja podataka podaci o šumama sve se više prikupljaju i metodama daljinskih istraživanja. Pojam daljinskoga istraživanja odnosi se na istraživanje površine Zemlje korištenjem značajki elektromagnetskih valova odaslanih ili odbijenih od istraživanih objekata radi poboljšavanja upravljanja prirodnim resursima, korištenja zemljišta i zaštite okoliša (Lillesand i Kiefer 1994).

Općenito, daljinska istraživanja uključuju sve aktivnosti od snimanja, procesiranja, analiziranja, interpretiranja do dobivanja korisnih informacija iz podataka prikupljenih tim istraživanjima (Oluić 2001). Primjenom metoda daljinskih istraživanja smanjuje se opseg terenskoga rada te se otvara mogućnost uštede vremena i novca (Pernar i Šelendić 2006, Klobučar i Pernar 2009).

Satelitska su daljinska istraživanja vrlo učinkovita metoda, a satelitski snimci korisno sredstvo za nadgledanje i proučavanje šumske vegetacije. Temeljna je postavka daljinskih istraživanja predvidjeti odnos između spektralnoga odbijanja i promatrane varijable. Kako protumačiti takav odnos zahtijeva pozna-

vanje reflektivnih svojstava promatranoga objekta (spektralna svojstva vegetacije, lista, ...), veličine prikaza područja (prostorna rezolucija) te ostale čimbenike, kao što su topografija, visina sunca, nagib i orijentacija između snimljene površine i senzora za snimanje (Wulder i dr. 2004). Za detaljnu i kvalitetnu analizu satelitskih snimaka, za prepoznavanje i izdvajanje određenih podataka vrlo su važne rezolucije satelitskih snimaka, a osobito prostorna rezolucija.

Dobivanje informacija o šumama iz satelitskih snimaka bio je predmet velikoga broja istraživanja. Mnogi autori istražuju planimetrijski i tematski potencijal snimaka sa satelita Landsat za kartiranje i inventuru prirodnih bogatstava te kartiranje načina korištenja zemljišta (Wastenson i dr. 1978, Ceusters i dr. 1978, Carneiro 1980, Cihlar i dr. 1980, Jaskolla i Hirschheider 1987).

Istraživale su se mogućnosti primjene satelitskih i aerosnimaka snimaka za procjenu taksacijskih veličina (Franklin 2003), volumena sastojina (Hall i dr. 1991, Franklin i dr. 1995, Gerylo i dr. 2002, Mäkelä i dr. 2004.), oštećenosti šuma, vegetacije (Hall i dr. 2003, Jensen 2000, Fuller 2001, Maselli 2004). Procjenu i usporedbu volumena sastojine sa satelitskih snimaka različite prostorne rezolucije (IKONOS, IRS, LANDSAT ETM+, SPOT) provode u svojim istraživanjima Shresta (2001) i Hagner (2002). Jednom riječju satelitski su snimci našli vrlo široku primjenu u šumarstvu.

## 2. Problematika istraživanja – *Research problem*

Nova era daljinskih istraživanja počinje krajem 90-ih godina 20. stoljeća lansiranjem nove generacije satelita visoke rezolucije (IKONOS), koji omogućuju znanstvenicima da istražuju njihovu primjenu i mogućnost upotrebe za praćenje prirodnih bogatstava. Satelitski snimci visoke rezolucije sa satelita IKONOS mogu biti korisni za mnoge gospodarske resurse (Goetz i dr. 2003). Satelitski snimci metarske i centimetarske rezolucije, kao pankromatski snimci IKONOS i Quickbird, uglavnom su korišteni u tropskim šumama za vizualnu interpretaciju, delineaciju krošanja stabala (Asner i dr. 2002, Read i dr. 2003, Clark i dr. 2004a, 2004b).

Lizarazo (2006) procjenjuje rezultate i uspoređuje primjenjivost metoda stabla odlučivanja (*decision tree*) i najveće vjerodostojnosti (*maximum likelihood*) nadzirane klasifikacije pri kartiranju pokrovnosti i načina korištenja urbanoga zemljišta. Nadalje Lennartz i dr. (2004) koriste satelitski snimak IKONOS za klasifikaciju i kartiranje tipova šumske pokrovnosti.

Koristeći se vizualnom interpretacijom satelitskoga snimka IKONOS (1m PAN i 4m MS) za prouča-

vanje strukture šuma, Read i dr. (2003) zaključuju da su takvi snimci odličan izvor podataka za procjenu, praćenje stanja i analizu. Kawamura i dr. (2004) opisuju metodu prepoznavanja parametara nužnih za razlikovanje, prepoznavanje šumskih vrsta (tipova) na satelitskim snimcima IKONOS, kao i spektralne i teksturne značajke tih vrsta. Usporedbu vegetacijskih indeksa dobivenih i izračunatih s različitim senzora istražuju Steven i dr. (2003).

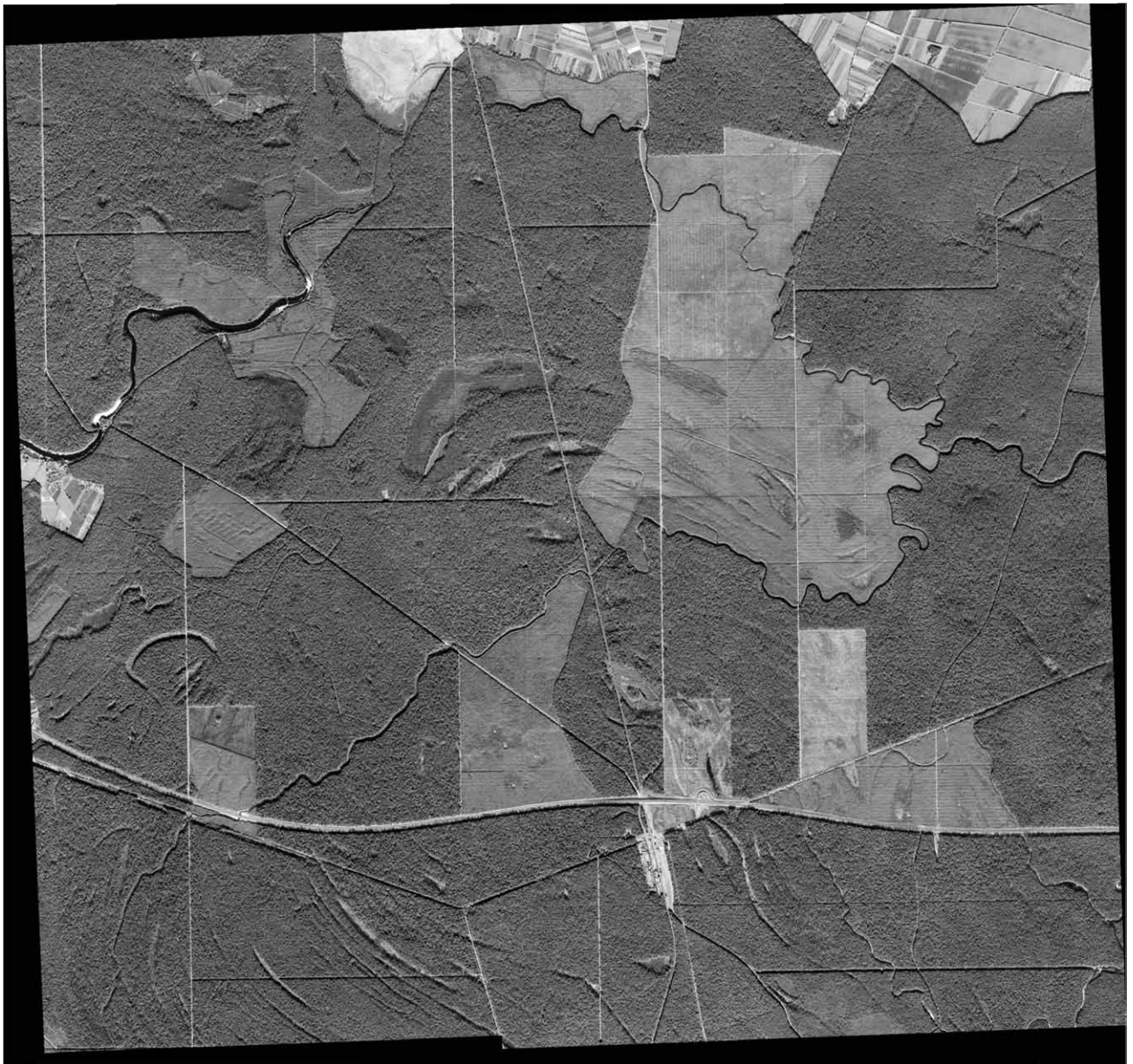
Dosadašnja istraživanja u hrvatskom šumarstvu temeljila su se na satelitskim snimcima snimljenim tematskim kartografom (*Thematic mapper*) sa satelita Landsat 5 TM i 7 ETM+. Prvo upoznavanje šumarskih stručnjaka s primjenom satelitskih snimaka datira iz 1993. godine kada Benko i Kušan opisuju mogućnost izravnoga uklapanja rezultata interpretacije satelitskih snimaka u GIS-ov model. Nadalje, Lampek i Kušan (1994) koriste satelitske snimke Landsat TM za kartiranje načina korištenja zemljišta te proučavaju mogućnosti povećanja interpretabilnosti tih snimaka.

Mogućnost kartiranja pomoću satelitskih snimaka Landsat TM istražuje Kušan (1996) te određuje spektralna svojstva vrste drveća i šumskih sastojina i na temelju tih istraživanja postavlja regresijske modele za procjenu sastojinskih veličina. Pejnović (2000) uspoređuje digitalnu i vizualnu interpretaciju satelitskoga snimka Landsat TM za potrebe inventure šuma. Primjenjivost regresijskih modela za procjenu sastojinskih veličina na satelitskim snimcima proučavaju Kovač (2001) te Kušan i Pernar (2001). Pernar i Šelendić (2006) istražuju način poboljšanja odnosno povećanja interpretabilnosti aerosnimaka i satelitskih snimaka Landsat 7 ETM+ za potrebe uređivanja šuma.

Vukelić i dr. (2006) rade usporedbu, kontrolu i mogućnost nadopune rezultata kartiranja šumske vegetacije sjevernoga Velebita s kartom pokrova zemljišta Hrvatske (CORINE Land Cover 2000 Hrvatska) izrađenoj na temelju ortorektificiranih satelitskih snimaka Landsat 5 TM i Landsat 7 ETM+. U posljednje se vrijeme koriste za potrebe Nacionalne inventure Hrvatske satelitski snimci sa satelita SPOT, Aster i IRS za provedbu kontrolirane i nekontrolirane klasifikacije zemljišta i uspostavu regresijskih modela za procjenu sastojinskih veličina (Čavlović 2010). Također Seletković i dr. (2008) ispituju točnost klasifikacije satelitskoga snimka visoke prostorne rezolucije IKONOS za potrebe šumarstva.

Na temelju navedenoga vidljivo je da su satelitski snimci u svijetu i u nas korišteni u raznim aspektima istraživanja. Proučavao se potencijal satelitskih snimaka, rađene su analize učinkovitosti za kartiranje pokrovnosti zemljišta, načina korištenja zemljišta, šumskih sastojina te pojedinačnih stabala, istraživa-





**Slika 1.** Satelitski snimak IKONOS  
**Fig. 1** IKONOS satellite image

na je i ocjenjivana točnost klasifikacije (vizualna i digitalna), procjenjivana je biomasa, istraživale su se mogućnosti primjene satelitskih snimaka za procjenu taksacijskih veličina, volumena sastojina, oštećenosti šuma, vegetacije, kartiranje opožarenih područja i praćenje sukcesije vegetacije.

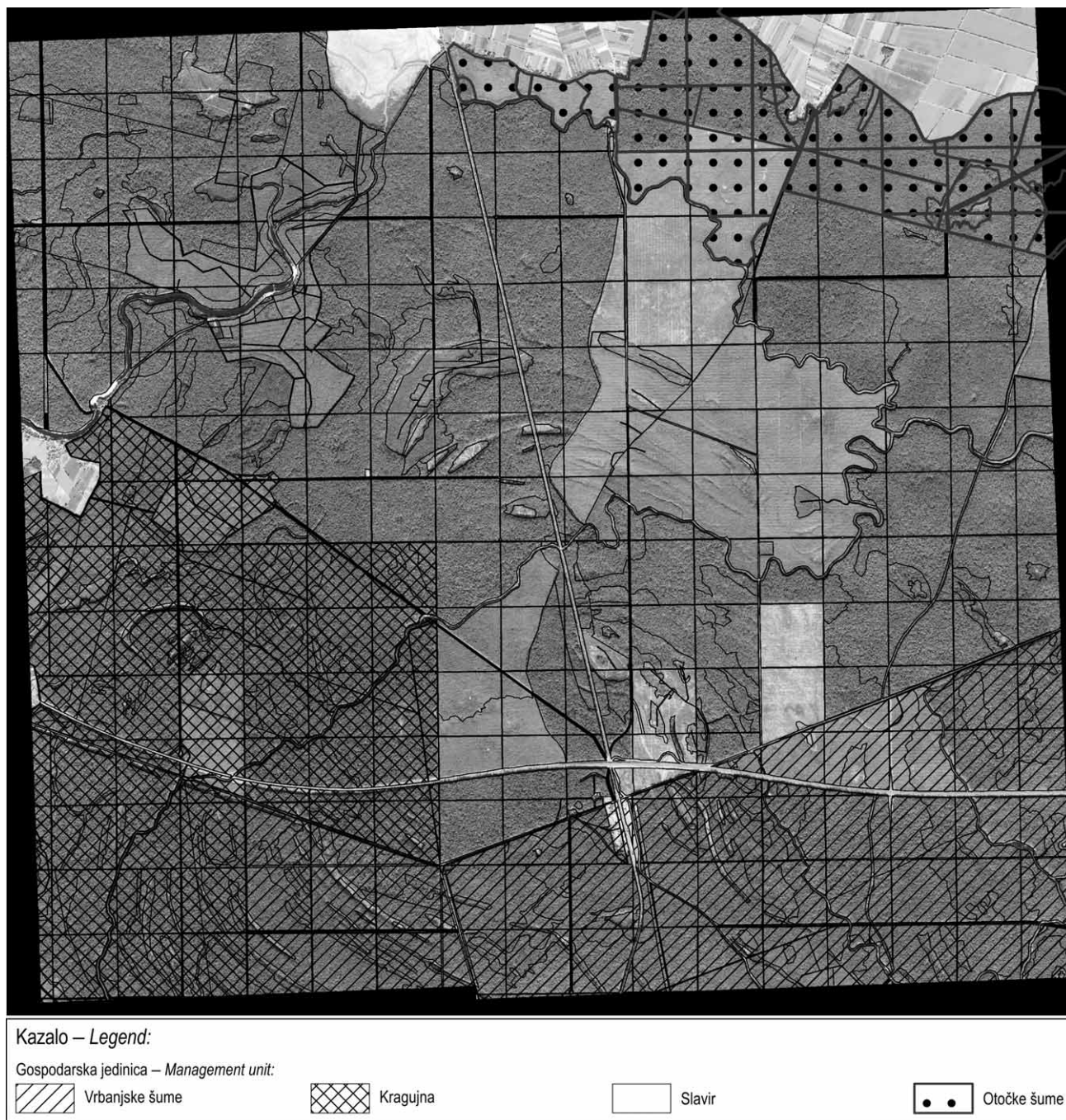
Rezultati tih istraživanja potvrdili su mogućnost primjene satelitskih snimaka u šumarstvu. Budući da satelitski snimci visoke prostorne rezolucije nisu dosad našli veću primjenu u hrvatskom šumarstvu, nameće se ideja o mogućnosti njihove primjene. Tako je i osnovni cilj ovoga rada istražiti odnose izme-

đu spektralnoga odbijanja zabilježenoga na satelitskom snimku visoke prostorne rezolucije IKONOS i pojedine sastojinske veličine, a samim tim i regresijske modele za procjenu sastojinskih veličina.

### **3. Materijal i metode istraživanja** *Material and methods*

Glavni materijal za izradu ovoga rada bio je satelitski snimak visoke prostorne rezolucije IKONOS (slika1) površine 132 km<sup>2</sup> u 5 spektralnih kanala: PAN (1 × 1m) i 4 MS Bundle. Cjelokupna obra-





**Slika 2.** Područje istraživanja

**Fig. 2** Research area

da satelitskoga snimka za potrebe istraživanja napravljena je pomoću programskoga paketa ERDAS IMAGINE 9.3.

Ortorektifikacija satelitskoga snimka IKONOS provedena je pomoću digitalnoga modela reljefa i Hrvatske osnovne karte (HOK 1 : 5000) te digitalnoga ortofota (DOF 1 : 5000). Naime, satelitski snimci

moraju biti »stavljani u stvarnost« kako bi se mogli povezati u geografski informacijski sustav (GIS), odnosno kako bi uopće mogli prikazivati realne odnose između proporcija objekata u stvarnosti i objekata na snimcima.

Određene su temeljne kontrolne točke (GCP) s točnim geografskim koordinatama. Koristili su se

**Tablica 1.** Rezultati kanoničke korelacije  
**Table 1** Results of canonical correlation

Varijable Variables		Dobni razred - Age class				
		2	3	5	6	7
Broj stabala Number of trees	Hrast - <i>Pedunculatae oak</i>	$r = 0,911$ $R^2 = 83,0 \%$	$r = 0,952$ $R^2 = 90,67 \%$	$r = 0,908$ $R^2 = 82,4 \%$	$r = 0,751$ $R^2 = 56,4 \%$	$r = 0,648$ $R^2 = 42,0 \%$
	Jasen - <i>Ash</i>					
	Grab - <i>Hornbeam</i>					
	Ostalo - <i>Other</i>					
Prsni promjer Diameter at breast height	Hrast - <i>Pedunculatae oak</i>	$r = 0,774$ $R^2 = 59,84 \%$	$r = 0,917$ $R^2 = 84,07 \%$	$r = 0,847$ $R^2 = 71,72 \%$	$r = 0,46$ $R^2 = 21,19 \%$	$r = 0,716$ $R^2 = 51,28 \%$
	Jasen - <i>Ash</i>					
	Grab - <i>Hornbeam</i>					
	Ostalo - <i>Other</i>					
Visina Height	Hrast - <i>Pedunculatae oak</i>	$r = 0,872$ $R^2 = 76,05 \%$	$r = 0,957$ $R^2 = 91,53 \%$	$r = 0,832$ $R^2 = 69,22 \%$	$r = 0,0512$ $R^2 = 26,23 \%$	$r = 0,565$ $R^2 = 31,96 \%$
	Jasen - <i>Ash</i>					
	Grab - <i>Hornbeam</i>					
	Ostalo - <i>Other</i>					
Temeljnica Basal area	Hrast - <i>Pedunculatae oak</i>	$r = 0,874$ $R^2 = 76,47 \%$	$r = 0,921$ $R^2 = 84,86 \%$	$r = 0,901$ $R^2 = 81,17 \%$	$r = 0,703$ $R^2 = 49,38 \%$	$r = 0,756$ $R^2 = 57,15 \%$
	Jasen - <i>Ash</i>					
	Grab - <i>Hornbeam</i>					
	Ostalo - <i>Other</i>					
Drvena zalih Volume	Hrast - <i>Pedunculatae oak</i>	$r = 0,856$ $R^2 = 73,32 \%$	$r = 0,900$ $R^2 = 81,30 \%$	$r = 0,896$ $R^2 = 80,28 \%$	$r = 0,686$ $R^2 = 47,10 \%$	$r = 0,759$ $R^2 = 57,61 \%$
	Jasen - <i>Ash</i>					
	Grab - <i>Hornbeam</i>					
	Ostalo - <i>Other</i>					

Iako prepoznatljivi objekti, poput raskrižja putova ili prosjeka, dijelova autoceste itd. Točnost ovisi o preciznosti izvora korištenoga za određivanje kontrolnih točaka. Upotrijebljeni softver prikazuje razinu pogreške za svaku točku, što pomaže pri određivanju točne pozicije. Kako se radi o ravnom terenu, za ovu se proceduru koristilo približno 30 – 40 točaka.

Nakon što su točke definirane, odabrana je tehnika prilagođavanja snimka prema različitim, prethodno definiranim točkama. Ovaj proces na kraju dovodi do rektificiranoga snimka. Kada uključimo altimetričke podatke (DMR), snimak je ortorektificiran.

Osim podataka o DMR-u potrebni su i podaci o senzoru korištenom za snimanje te podaci o položaju Sunca u trenutku snimanja. Svi navedeni podaci isporučeni su zajedno sa snimkom. Krajnji je rezultat ove metode snimak koji, bez obzira na različitosti u reljefu, prikazuje jednaku vrijednost digitalnoga broja (DN) za iste vrste objekata, neovisno o njihovu položaju u prostoru.

Na istraživanom je području provedena terenska izmjera sastojinskih veličina u uređajnim razredima hrasta lužnjaka i poljskoga jasena u svim dobnim razredima (2. do 7. dobnoga razreda) koja se uspore-

dila s podacima iz Osnova gospodarenja te je uspostavljena baza podataka s odjelima i odsjecima u sklopu dviju gospodarskih jedinica: Vrbanske šume i Slavir. Najveći broj, ukupno 504 odsjeka, pripada uređajnomu razredu hrasta lužnjaka. Za svaki odsjek očitana je sa satelitskoga snimka srednja vrijednost spektralnoga odbijanja unutar četiriju kanala. Te su očitane vrijednosti pridružene navedenoj bazi podataka.

Za sve varijable provedena je deskriptivna statistika. U svim je analizama razina značajnosti od 5 % smatrana statistički značajnom. Kanoničkom korelacijskom analizom ispitana je povezanost između linearne kombinacije vrijednosti kanala i linearne kombinacije vrijednosti terenskih podataka za svako obilježje posebno (broj stabala, prsni promjer, visina, temeljnica i volumen). Budući da nema jedinstvenoga rješenja, treba promatrati linearnu kombinaciju koja daje najbolju korelaciju između promatranih varijabli.

Povezanost između aritmetičkih sredina vrijednosti spektralnih odbijanja po kanalima i varijabli procijenjena je Pearsonovom korelacijom. Rezultati procjene na satelitskom snimku uspoređeni su s po-



dacima terenske izmjere, odnosno s podacima preuzetim iz osnova gospodarenja. Na temelju tih podataka dobiveni su odnosi između spektralnoga odbijanja zabilježenoga na satelitskom snimku i pojedine sastojinske veličine, a samim tim i regresijski modeli za procjenu sastojinskih veličina. Za svaku sastojinsku veličinu procijenjena su dva regresijska modela unutar uređajnoga razreda hrasta lužnjaka, i to za svaki dobnii razred posebno. Prvi je model procijenjen pomoću *stepwise* procedure, pri čemu su nezavisne varijable bile vrijednosti svih četiriju kanala, s tim da se odabire kombinacija onih kanala koji najbolje objašnjavaju zavisnu varijablu. Drugi je regresijski model sadržavao kombinaciju svih četiriju kanala zajedno.

#### 4. Područje istraživanja – Research area

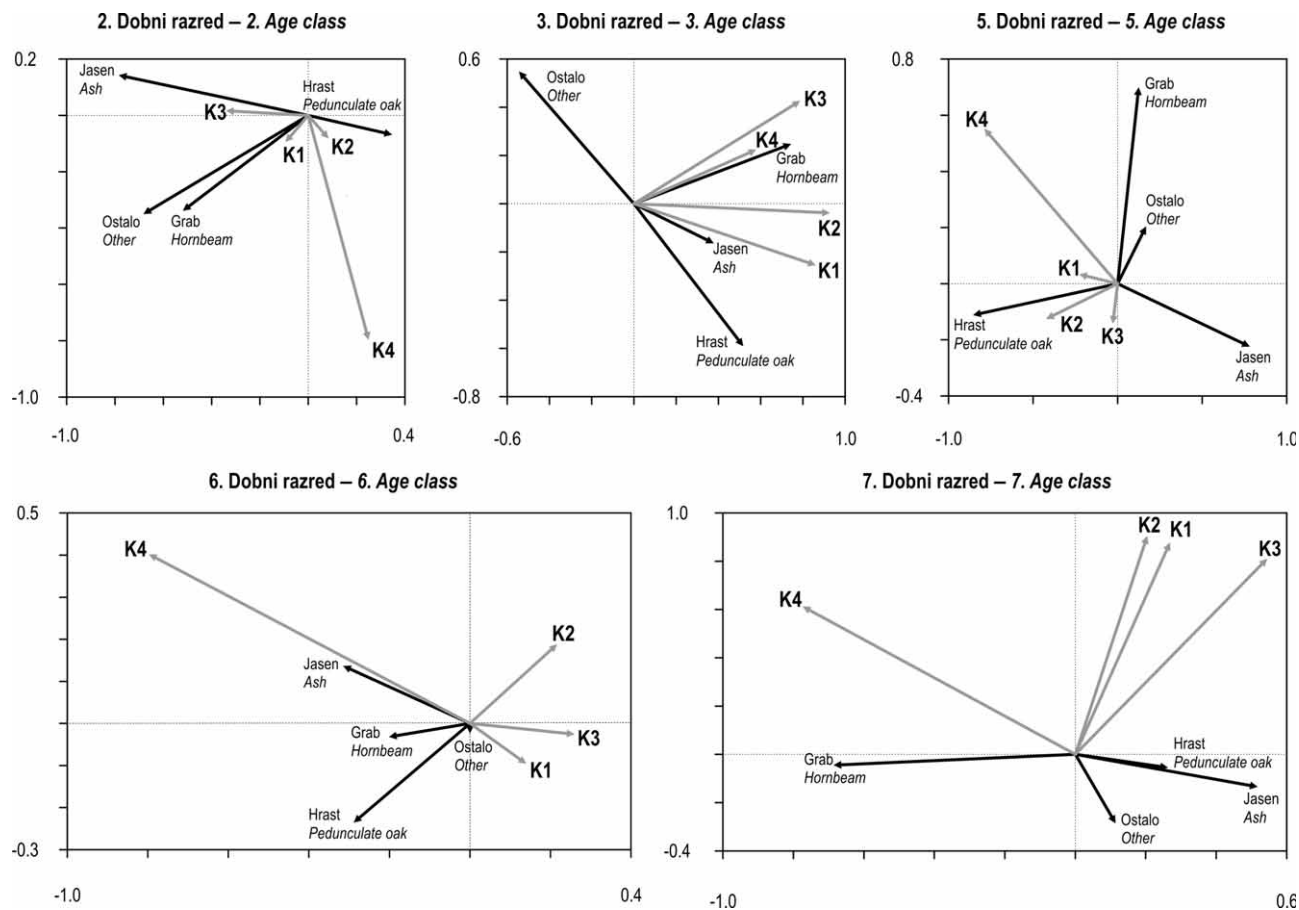
Za potrebe istraživanja odabrane su spačvanske šume te je naručeno satelitsko snimanje prema definiranom području obuhvata. Snimanje je obavljeno 18. listopada 2006. godine. Iz toga je snimanja dobi-

ven satelitski snimak IKONOS područja spačvanskih šuma (slika 2). Snimak djelomično ili u potpunosti pokriva četiri gospodarske jedinice (Vrbanjske šume, Otočke šume, Slavir, Kragujna).

### 5. Rezultati istraživanja i rasprava Results of research and discussion

Najprije je za sve varijable (broj stabala, visina, prsni promjer, temeljnica i volumen) provedena deskriptivna statistika. Za sva četiri kanala satelitskoga snimka IKONOS utvrđene su vrijednosti spektralnih odbijanja s obzirom na promatrane dobne razrede. Najbolja korelacija između promatranih varijabli i spektralnih vrijednosti pojedinih kanala utvrđena je pomoću kanoničke korelacije.

Iz tablice 1 vidljivo je da je kanonička korelacija za sva promatrana obilježja u trećem dobnom razredu veća od 0,9. U trećem dobnom razredu prvo kanoničko rješenje za kombinaciju s četiri kanala, s kombinacijom broja stabala uz korelaciju od 0,95 zajednički objašnjava (preklapa se) 90 % varijabilno-



Slika 3. Prikaz smjera i jačine korelacije za broj stabala po dobnim razredima  
Fig. 3 Direction and strength of correlation between the number of trees per age classes

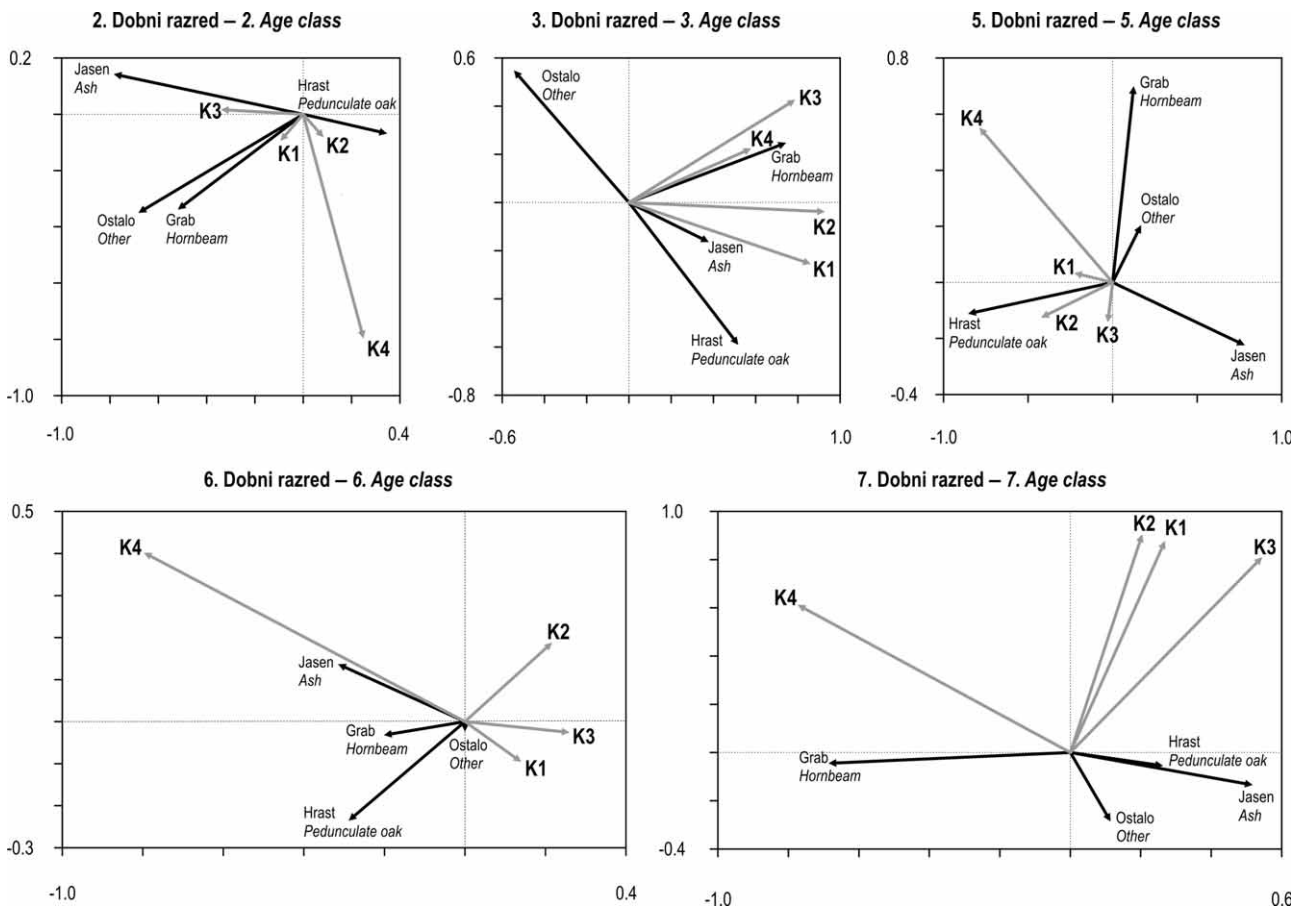
sti. Najlošija se korelacija 0,46 pokazala za prsni promjer i za sva 4 kanala u 6. dobnom razredu, s preklapanjem varijabilnosti od 21,19 %. Promatra li se kanonička korelacija za broj stabala po svim dobnim razredima, razvidno je da su dobre korelacije u drugom (0,91), trećem (0,95) i petom (0,91) dobnom razredu gdje se objašnjava 80 – 90 % varijabilnosti, dok je kod šestoga i sedmoga dobnoga razreda korelacija od 0,75 i 0,65 uz koeficijente determinacije  $R^2 = 56,4\%$  i 42 %. Također su vrlo slični rezultati kod drvnoga volumena gdje je najlošija korelacija u šestom (0,69) i sedmom (0,76) dobnom razredu. Navedeno je vidljivo na slikama 3 i 4, na kojoj jačinu korelacije objašnjava duljina strelice (smjer), a kut između promatranih varijabli označava pozitivnu ili negativnu korelaciju (manji kut, korelacija pozitivna).

Regresijski modeli za procjenu sastojinskih veličina dobiveni su na temelju vrijednosti spektralnoga odbijanja zabilježenoga na satelitskom snimku pojedine sastojinske veličine.

Za svaku sastojinsku veličinu procijenjena su dva regresijska modela unutar uređajnoga razreda

hrasta lužnjaka (1101), i to za svaki dobni razred posebno (tablice 2 – 6). Iz rezultata procjena regresijskih modela za drugi dobni razred (tablica 2) najbolje se procjenjuje broj jasenovih stabala. Za model koji sadrži sva četiri kanala koeficijent determinacije  $R^2 = 61,50$ , dok za model u kojem se broj stabala procjenjuje pomoću postupne (*stepwise*) procedure značajna su se pokazala samo dva kanala: K2 i K3 i  $R^2 = 60,60$ . Rezultati procjene modela za broj grabovih stabala pokazuju da se pomoću sva četiri kanala objašnjava oko 41 % varijabilnosti broja grabovih stabala, a da se ukupan broj stabala opisuje s 55,95 % varijabilnosti.

Što se tiče prsnoga promjera svih vrsta, vrijednosti su koeficijenta determinacije ispod 20 %, pa se može zaključiti da u drugom dobnom razredu nije opravdano procjenjivati prsni promjer pomoću vrijednosti spektralnih odbijanja. Pri procjeni visine najbolji se pokazao model za grab. Koeficijent determinacije za sva četiri kanala iznosi  $R^2 = 69,22$ . Izbacimo li iz modela kanal K3, koeficijent se determinacije gotovo ne mijenja:  $R^2 = 69,21$ .



Slika 4. Prikaz smjera i jačine korelacije za volumen po dobnim razredima  
 Fig. 4 Direction and strength of correlation between the volume per age classes

**Tablica 2.** Rezultati regresijskih modela za drugi dobni razred**Table 2** Results of regression model for the second age class

Varijable Variables		Postupno - Stepwise					Svi kanali - All bands					
		Kanali Bands	K1	K2	K3	K4	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	K4	R <sup>2</sup>
Broj stabala Number of trees	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>							-5,27	58,74	-62,68	-0,15	12,68
	Jasen - <i>Ash</i>	K2, K3		-100,51	112,09		60,60	34,16	-122,30	98,72	0,21	61,50
	Grab - <i>Hornbeam</i>	K1, K2, K4	82,09	-79,29		5,70	40,95	88,34	-80,23	-5,62	5,69	41,14
	Ostalo - <i>Other</i>							94,44	-126,71	36,83	8,43	56,92
	Ukupno - <i>Total</i>							170,55	-263,77	101,31	13,00	55,95
Prsni promjer Diameter at breast height	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>	K4				-0,04	6,01	-0,28	0,43	-0,13	-0,06	12,79
	Jasen - <i>Ash</i>	K2, K4		0,13		-0,06	19,17	-0,03	0,23	-0,08	-0,07	19,77
	Grab - <i>Hornbeam</i>							-0,66	0,59	0,18	-0,07	15,95
	Ostalo - <i>Other</i>	K1, K2, K4	-1,52	1,69		-0,09	51,15	-1,39	1,65	-0,10	-0,09	51,40
Visina Height	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>							0,36	-0,11	-0,25	-0,01	17,99
	Jasen - <i>Ash</i>	K4				-0,04	8,56	-0,19	0,22	0,05	-0,05	14,74
	Grab - <i>Hornbeam</i>	K1, K2, K4	-0,54	0,48		-0,01	69,21	-0,53	0,48	0,00	-0,01	69,22
	Ostalo - <i>Other</i>							-0,54	0,45	0,10	0,00	15,00
Temeljnica Basal area	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>							-0,24	1,51	-1,42	-0,09	23,09
	Jasen - <i>Ash</i>	K2, K3		-1,56	1,76		59,37	0,54	-1,86	1,50	-0,01	60,57
	Grab - <i>Hornbeam</i>	K1, K2, K4	0,93	-0,90		0,07	33,78	1,03	-0,92	-0,09	0,07	34,05
	Ostalo - <i>Other</i>							1,11	-1,55	0,50	0,10	54,79
	Ukupno - <i>Total</i>							1,66	-2,63	1,11	0,05	46,39
Drvna zaliha Volume	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>							1,25	10,16	-12,51	-0,74	26,44
	Jasen - <i>Ash</i>	K2, K3		-11,90	13,39		56,73	2,87	-13,18	11,73	-0,18	57,79
	Grab - <i>Hornbeam</i>	K1, K2, K4	5,03	-4,88		0,37	32,24	5,46	-4,94	-0,39	0,37	32,43
	Ostalo - <i>Other</i>							6,19	-8,71	2,90	0,54	55,06
	Ukupno - <i>Total</i>	K4				-0,81	8,83	11,07	-15,48	5,37	-0,06	36,50

Za procjenu temeljnica u drugom dobnom razredu najbolje se pokazao model za jasen  $R^2 = 60,57$  sa sva 4 kanala, a postupna je procedura izdvojila samo dva kanala K2 i K3 s  $R^2 = 59,37$ . Za procjenu ukupne temeljnica u modelu sa sva 4 kanala  $R^2 = 46,39$ .

Što se tiče volumena, rezultati su vrlo slični, no najbolja je procjena pomoću modela dobivena za drveni volumen jasena  $R^2 = 57,79$ , a postupna je procedura također izdvojila samo kanale K2 i K3 s  $R^2 = 56,73$ .

Na temelju navedenoga može se zaključiti da su se kanali K2 i K3 pokazali najboljima za procjenu parametara jasena u drugom dobnom razredu.

Za treći dobni razred rezultati procjena regresijskih modela prikazani su u tablici 3. Broj stabala najbolje se procjenjuje za hrast, pa tako u modelu sa četiri kanala koeficijent determinacije iznosi  $R^2 = 70,08$  %, a postupnom procedurom izdvojeni su

kanali K1 i K3 sa  $R^2 = 68,25$  %. Također rezultati procjene modela broja grabovih stabala pokazuju da se pomoću sva četiri kanala objašnjava 61,60 % varijabilnosti, a da se ukupan broj stabala trećega dobna razreda sa sva četiri kanala opisuje sa 70,41 % varijabilnosti.

Pri procjeni prsnoga promjera najbolji se pokazao regresijski model za hrast s vrijednostima koeficijenta determinacije u modelu sa sva četiri kanala  $R^2 = 68,13$  % i za grab s koeficijentom determinacije  $R^2 = 60,14$  %.

U modelima procjene visine stabala najboljim se pokazao model za jasen u modelu sa sva četiri kanala s koeficijentom determinacije  $R^2 = 63,92$  %, a postupnom su procedurom izdvojeni kanali K1 i K3 sa  $R^2 = 59,22$  %. Također rezultati procjene modela za visinu hrastovih stabala pokazuju da se pomoću sva četiri kanala objašnjava oko 52 % varijabilnosti visine hrastovih stabala.



**Tablica 3.** Rezultati regresijskih modela za treći dobní razred**Table 3** Results of regression model for the third age class

Varijable Variables		Postupno – Stepwise					Svi kanali – All bands					
		Kanali Bands	K1	K2	K3	K4	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	K4	R <sup>2</sup>
Broj stabala Number of trees	Hrast – <i>Pedunculate oak</i>	K1, K3	27,11		-30,54		68,25	10,41	19,86	-44,55	0,48	70,08
	Jasen – <i>Ash</i>	K1	10,25				24,50	-0,82	12,77	-23,31	2,76	33,66
	Grab – <i>Hornbeam</i>	K3			55,05		47,45	-74,45	103,93	-6,79	-3,48	61,60
	Ostalo – <i>Other</i>	K1, K4	-28,82			7,15	77,27	-9,14	-24,47	14,56	7,34	79,59
	Ukupno – <i>Total</i>	K2		38,64			58,89	-74,00	112,09	-60,09	7,10	70,41
Prsni promjer Diameter at breast height	Hrast – <i>Pedunculate oak</i>	K2		-1,47			32,06	9,18	-13,15	8,77	-0,06	68,13
	Jasen – <i>Ash</i>							3,41	-5,08	3,79	0,26	41,22
	Grab – <i>Hornbeam</i>	K1	-0,93				50,52	0,63	-2,34	1,88	0,07	60,14
	Ostalo – <i>Other</i>							1,56	-2,83	3,19	0,08	26,12
Visina Height	Hrast – <i>Pedunculate oak</i>							1,17	-1,54	0,97	0,00	52,14
	Jasen – <i>Ash</i>	K1, K3	-0,61		0,89		59,22	-0,15	-0,63	1,16	0,04	63,92
	Grab – <i>Hornbeam</i>	K2		-0,15			20,22	0,53	-0,90	0,51	0,03	31,07
	Ostalo – <i>Other</i>							0,94	-1,21	1,18	-0,01	20,36
Temeljnica Basal area	Hrast – <i>Pedunculate oak</i>	K1, K2	4,11	-3,23			62,40	5,00	-4,62	0,93	0,09	66,26
	Jasen – <i>Ash</i>	K4				0,26	52,62	2,35	-2,88	1,69	0,27	63,55
	Grab – <i>Hornbeam</i>	K3			1,45		47,69	-1,83	2,08	0,50	-0,03	55,81
	Ostalo – <i>Other</i>							0,94	-2,42	2,23	0,21	75,84
	Ukupno – <i>Total</i>	K4				0,60	61,20	6,46	-7,85	5,35	0,54	79,73
Drvna zaliha Volume	Hrast – <i>Pedunculate oak</i>	K1, K2	58,77	-46,93			58,93	77,01	-74,68	20,02	1,27	65,31
	Jasen – <i>Ash</i>	K4				3,30	51,51	31,86	-41,27	26,76	3,63	65,13
	Grab – <i>Hornbeam</i>	K3			13,64		46,65	-15,31	16,24	6,90	-0,08	53,21
	Ostalo – <i>Other</i>							13,24	-30,06	29,66	1,92	66,23
	Ukupno – <i>Total</i>	K4				7,04	47,04	106,78	-129,76	83,34	6,75	74,20

Kod ovoga dobnoga razreda primjećuje se da se od svih promatranih parametara najbolje može procijeniti temeljnica, kako svih vrsta drveća pojedinačno, tako i ukupno. Procjenu temeljnice po vrstama drveća najbolje opisuje model za hrast, uključujući sva četiri kanala, s vrijednosti koeficijenta determinacije  $R^2 = 66,26\%$ , te model za jasen sa  $R^2 = 63,55\%$ . Ukupna temeljnica trećega dobnoga razreda u modelu koji uključuje sva četiri kanala opisuje se sa  $79,73\%$  varijabilnosti.

Slični rezultati kao kod procjene temeljnice, vidljivi su i za drvni volumen. Tako rezultati procjene modela volumena hrasta pokazuju da se pomoću sva četiri kanala objašnjava  $65,31\%$  varijabilnosti, za jasen  $65,13\%$ , grab  $53,21\%$ , a ukupni volumen opisuje se s  $74,20\%$  varijabilnosti.

Iz rezultata procjene regresijskih modela za treći dobní razred vidljivo je da se svi promatrani parametri (broj stabala, prsni promjer, visina, temeljnica i

volumen) jako dobro procjenjuju u modelima sa sva četiri kanala s koeficijentima determinacije od  $60\%$  do  $80\%$ .

Rezultati procjena regresijskih modela za peti dobní razred prikazani su u tablici 4. Kao što je vidljivo iz tablice, najbolji rezultati procjene sastojinskih veličina na temelju izrađenih regresijskih modela postignuti su za broj stabala hrasta u modelu sa sva četiri kanala s koeficijentom determinacije  $R^2 = 76,13\%$ .

Rezultati procjene modela broja jasenovih stabala pokazuju da se pomoću sva četiri kanala objašnjava  $67,12\%$  varijabilnosti. Što se tiče prsnoga promjera može se istaknuti samo hrast s vrijednosti koeficijenta determinacije od  $R^2 = 38,82\%$ .

Kod procjene visine najbolji se pokazao regresijski model za grab s vrijednostima koeficijenta determinacije, u modelu sa sva četiri kanala  $R^2 = 51,86\%$ , i za hrast s koeficijentom determinacije  $R^2 = 30,19\%$ .

**Tablica 4.** Rezultati regresijskih modela za peti dobni razred**Table 4** Results of regression model for the fifth age class

Varijable Variables		Postupno - Stepwise						Svi kanali - All bands				
		Kanali Bands	K1	K2	K3	K4	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	K4	R <sup>2</sup>
Broj stabala Number of trees	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>	K1, K2, K3, K4	-39,72	51,17	-16,41	2,99	76,13	-39,72	51,17	-16,41	2,99	76,13
	Jasen - <i>Ash</i>	K1, K2, K3, K4	20,03	-26,15	19,61	-6,40	67,12	20,03	-26,15	19,61	-6,40	67,12
	Grab - <i>Hornbeam</i>							81,05	-67,64	-10,69	4,16	42,34
	Ostalo - <i>Other</i>							10,17	-12,15	1,77	0,68	6,92
	Ukupno - <i>Total</i>							67,35	-60,69	0,39	2,47	19,69
Prsni promjer Diameter at breast height	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>	K1, K2, K4	3,57	-3,73		-0,27	37,58	3,47	-4,08	0,76	-0,25	38,82
	Jasen - <i>Ash</i>	K2		-1,39			18,85	-0,19	-2,34	1,84	0,13	23,08
	Grab - <i>Hornbeam</i>							1,34	-1,22	0,26	0,03	11,38
	Ostalo - <i>Other</i>	K1, K3, K4	1,11		-0,92	-0,18	37,52	0,81	0,32	-0,98	-0,20	38,07
Visina Height	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>	K1, K2	0,65	-0,74			24,06	0,50	-0,71	0,23	-0,04	30,19
	Jasen - <i>Ash</i>	K2		-0,57			23,63	0,06	-1,04	0,66	0,07	28,13
	Grab - <i>Hornbeam</i>							3,39	-2,89	0,36	0,05	51,86
	Ostalo - <i>Other</i>	K1, K2, K3	1,82	-0,96	-0,59		45,86	1,66	-0,75	-0,66	-0,06	48,64
Temeljnica Basal area	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>	K4				0,48	41,46	-2,27	2,29	-0,30	0,37	52,08
	Jasen - <i>Ash</i>	K4				-0,55	44,20	1,16	-1,84	1,01	-0,44	51,61
	Grab - <i>Hornbeam</i>							2,24	-2,11	-0,03	0,13	40,33
	Ostalo - <i>Other</i>							0,44	-0,34	-0,11	0,00	8,24
	Ukupno - <i>Total</i>	K1, K2	1,38	-1,56			12,96	1,49	-2,03	0,58	0,09	15,94
Drvena zaliha Volume	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>	K4				6,99	34,22	-29,90	27,56	-1,21	5,79	40,66
	Jasen - <i>Ash</i>	K4				-7,57	41,49	15,81	-25,06	12,17	-5,93	48,42
	Grab - <i>Hornbeam</i>							26,56	-26,28	0,71	1,84	41,97
	Ostalo - <i>Other</i>							6,36	-4,51	-1,76	0,03	11,44
	Ukupno - <i>Total</i>	K2		-6,27			8,34	18,39	-28,06	9,18	1,77	15,08

Promatra li se temeljnica, najbolje se procjenjuje za hrast  $R^2 = 52,08\%$ , u modelu sa sva četiri kanala i za jasen  $R^2 = 51,61\%$ , dok pri procjeni drvnoga volumena model za jasen objašnjava  $48,42\%$  varijabilnosti, za grab  $41,97\%$ , a volumen hrasta opisuje se s  $40,66\%$  varijabilnosti.

Prikazani rezultati procjene regresijskih modela za šesti dobni razred (tablica 5) pokazuju da su vrijednosti koeficijenta determinacije za hrast za sve promatrane varijable niski (ispod  $20\%$ ), pa se može zaključiti da u šestom dobnom razredu nije opravdano procjenjivati sastojinske veličine za hrast pomoću vrijednosti spektralnoga odbijanja u različitim kanalima. Isti se zaključak može dati ako se promatraju prsni promjeri i visina za sve vrste drveća.

Broj stabala najbolje se procjenjuje za jasen s koeficijentom determinacije  $R^2 = 45,32\%$ .

Kod temeljnice izdvojili su se jasen sa  $R^2 = 39,31\%$  i grab  $R^2 = 31,97\%$ .

Što se tiče volumena, najbolja je procjena pomoću modela dobivena za volumen jasena  $R^2 = 37,26\%$ , u modelu sa sva četiri kanala.

Rezultati procjene regresijskih modela za sedmi dobni razred (tablica 6) imaju sličan trend kao i za šesti dobni razred. Nije opravdano procjenjivati sastojinske veličine za hrast za sve promatrane varijable. U sedmom dobnom razredu potrebno je izdvojiti rezultate procjene modela za grab, koji pokazuje najveće vrijednosti koeficijenta determinacije za sve varijable.

Prikazani rezultati mogu se promatrati i uspoređivati sa sličnim istraživanjima na tom području. Tako Kayitakire i dr. (2006) u svom istraživanju na temelju teksturne analize satelitskoga snimka IKONOS procjenjuju pet glavnih sastojinskih parametara (dob, broj stabala, visina, opseg, temeljnica). Na temelju vrijednosti spektralnoga odbijanja koeficijenti determinacije ( $R^2$ ) kod jednostavne linearne regresije, za

**Tablica 5.** Rezultati regresijskih modela za šesti dobni razred**Table 5** Results of regression model for the sixth age class

Varijable Variables		Postupno – Stepwise						Svi kanali – All bands				
		Kanali Bands	K1	K2	K3	K4	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	K4	R <sup>2</sup>
Broj stabala Number of trees	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>	K1, K2, K3	-6,87	11,97	-7,04		8,44	-6,87	12,30	-7,33	-0,08	8,47
	Jasen - <i>Ash</i>	K1, K3, K4	2,86		5,24	-3,05	45,31	3,26	-0,66	5,55	-3,03	45,32
	Grab - <i>Hornbeam</i>	K2, K4		-11,12		6,96	33,61	3,30	-13,17	-0,88	6,91	33,68
	Ostalo - <i>Other</i>							6,32	-8,05	1,78	0,32	2,70
	Ukupno - <i>Total</i>	K1, K2, K4	14,43	-17,96		4,18	15,26	14,43	-17,67	-0,33	4,16	15,26
Prsni promjer Diameter at breast height	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>	K1, K2, K3, K4	1,90	-3,05	1,25	0,17	14,94	1,90	-3,05	1,25	0,17	14,94
	Jasen - <i>Ash</i>	K1, K4	-0,51			0,29	12,93	-0,59	-0,54	0,69	0,33	13,74
	Grab - <i>Hornbeam</i>	K1, K4	-0,18			0,12	9,09	-0,43	0,19	0,06	0,12	9,50
	Ostalo - <i>Other</i>							0,55	-0,53	-0,01	0,02	1,28
Visina Height	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>	K1, K2, K3, K4	0,19	-0,37	0,13	0,04	15,63	0,19	-0,37	0,13	0,04	15,63
	Jasen - <i>Ash</i>	K1, K4	-0,13			0,07	12,29	-0,09	-0,22	0,21	0,09	13,37
	Grab - <i>Hornbeam</i>	K4				0,05	5,30	-0,07	-0,04	0,06	0,05	6,07
	Ostalo - <i>Other</i>	K1, K2, K4	0,93	-0,75		-0,03	8,20	0,93	-0,89	0,16	-0,03	8,48
Temeljnica Basal area	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>	K2, K3, K4		0,42	-0,77	0,08	7,97	-0,11	0,52	-0,77	0,08	8,00
	Jasen - <i>Ash</i>	K1, K2, K3, K4	0,40	-0,68	0,92	-0,17	39,31	0,40	-0,68	0,92	-0,17	39,31
	Grab - <i>Hornbeam</i>	K2, K4		-0,47		0,29	31,87	-0,31	-0,46	0,11	0,30	31,97
	Ostalo - <i>Other</i>	K1, K2	0,38	-0,37			4,99	0,38	-0,45	0,07	0,02	5,81
	Ukupno - <i>Total</i>	K1, K2, K4	0,91	-1,09		0,21	17,75	0,90	-1,38	0,34	0,23	18,21
Drvena zaliha Volume	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>	K3, K4			-6,78	2,17	8,31	-0,03	5,55	-12,14	1,79	8,69
	Jasen - <i>Ash</i>	K1, K2, K3, K4	5,77	-10,72	13,94	-2,30	37,26	5,77	-10,72	13,94	-2,30	37,26
	Grab - <i>Hornbeam</i>	K2, K4		-6,10		3,84	29,96	-2,02	-6,87	2,77	4,00	30,18
	Ostalo - <i>Other</i>							5,55	6,22	0,85	0,18	6,66
	Ukupno - <i>Total</i>	K1, K2, K4	14,13	-17,71		3,39	17,45	14,01	-22,19	5,11	3,68	17,84

svih pet promatranih parametara, postižu vrijednosti između 0,30 i 0,66 %, što je vrlo slično ovim istraživanjima. Također je važno napomenuti da se u novije vrijeme bolji rezultati procjene sastojinskih parametara postižu kombinacijom ne samo vrijednosti spektralnih odbijanja nego i podacima dobivenim iz teksturne analize samoga snimka te upotrebom neuronskih mreža.

## 6. Zaključak – Conclusions

Na temelju provedenoga istraživanja i dobivenih rezultata mogu se izvesti ovi zaključci:

⇒ Kanonička korelacija za sva promatrana obilježja po svim dobnim razredima pokazala je da su dobre korelacije u drugom, trećem i petom dobnom razredu gdje se objašnjava 80 – 90 % varijabilnosti, dok je kod šestoga i sedmoga dobnoga razreda slaba korelacija.

⇒ Što se tiče mogućnosti procjena sastojinskih veličina na satelitskim snimcima, najboljima su se pokazali rezultati regresijskih modela za treći dobni razred, i to za broj stabala hrasta lužnjaka i ukupan broj stabala, ukupnu temeljnicu i ukupni drveni volumen, s koeficijentima determinacije od 60 % do 80 %.

⇒ Općenito iz rezultata procjene regresijskih modela utvrđeno je da se svi promatrani parametri (broj stabala, prsni promjer, visina, temeljnica i volumen) jako dobro procjenjuju u modelima sa sva četiri kanala unutar drugoga, trećega i petoga dobnoga razreda

⇒ Važno je napomenuti da su rezultati ovih istraživanja pokazali da u šestom i sedmom dobnom razredu nije opravdano procjenjivati sastojinske veličine za sve promatrane varijable zbog niskih vrijednosti koeficijenta determinacije.



**Tablica 6.** Rezultati regresijskih modela za sedmi dobni razred**Table 6** Results of regression model for the seventh age class

Varijable Variables		Postupno - Stepwise						Svi kanali - All bands				
		Kanali Bands	K1	K2	K3	K4	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	K4	R <sup>2</sup>
Broj stabala Number of trees	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>	K1, K3	-6,38		8,29		11,26	-3,87	-4,15	10,23	-0,02	12,73
	Jasen - <i>Ash</i>	K3, K4			5,80	-2,14	27,22	1,55	-3,07	7,45	-1,98	27,40
	Grab - <i>Hornbeam</i>	K3, K4			-20,04	3,61	38,54	-4,33	-3,19	-13,47	4,11	39,32
	Ostalo - <i>Other</i>	K3, K4			-2,60	-0,64	5,97	-0,94	6,31	-7,79	-1,08	7,67
	Ukupno - <i>Total</i>	K1, K4	-15,45			1,33	20,73	-7,91	-8,10	-0,66	1,59	22,21
Prsni promjer Diameter at breast height	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>	K2, K3		1,87	-2,74		13,52	0,28	1,99	-3,08	-0,05	13,97
	Jasen - <i>Ash</i>	K4				0,53	22,10	0,21	1,61	-1,61	0,40	23,63
	Grab - <i>Hornbeam</i>	K1, K4	-1,10			0,39	45,88	-0,60	-0,64	0,08	0,41	46,82
	Ostalo - <i>Other</i>	K1	0,40				2,69	0,61	-0,53	0,25	0,07	4,32
Visina Height	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>	K2, K3		0,32	-0,41		12,80	0,08	0,26	-0,42	0,00	13,28
	Jasen - <i>Ash</i>	K4				0,17	19,98	0,28	0,36	-0,71	0,13	22,27
	Grab - <i>Hornbeam</i>	K2, K4		-0,71		0,24	29,93	0,11	-1,01	0,23	0,25	30,18
	Ostalo - <i>Other</i>							0,63	-0,37	-0,19	0,14	3,87
Temeljnica Basal area	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>							-0,70	-0,23	1,10	0,00	7,31
	Jasen - <i>Ash</i>	K1, K4	0,38			-0,13	26,78	0,23	0,17	0,01	-0,14	27,18
	Grab - <i>Hornbeam</i>	K2, K3, K4		-0,66	-0,65	0,35	53,41	-0,51	-0,18	-0,70	0,34	54,33
	Ostalo - <i>Other</i>	K4				-0,01	1,96	0,06	0,09	-0,18	-0,02	4,05
	Ukupno - <i>Total</i>	K1, K4	-0,89			0,16	21,30	-0,89	-0,31	0,36	0,19	21,67
Drvna zaliha Volume	Hrast - <i>Pedunculate oak</i>							-12,74	-1,40	16,41	-0,03	5,55
	Jasen - <i>Ash</i>	K1, K4	5,72			-1,79	22,63	3,51	3,70	-1,33	-1,96	23,06
	Grab - <i>Hornbeam</i>	K1, K3, K4	-8,02		-12,00	4,76	54,06	-7,55	-1,17	-11,27	4,83	54,07
	Ostalo - <i>Other</i>							1,33	0,43	-1,94	-0,24	3,81
	Ukupno - <i>Total</i>	K1, K4	-12,64			2,59	14,92	-14,86	-0,54	3,57	2,73	15,12

⇒ Kako su se za procjenu strukturnih elemenata sastojine koristili podaci temeljeni na spektralnim informacijama iz piksela, mogući razlog lošijih rezultata procjene sastojinskih veličina za šesti i sedmi dobni razred leži i u prostornoj rezoluciji satelitskoga snimka IKONOS. Naime, snimci visoke prostorne rezolucije nerijetko pokazuju izolirane piksele (klasificirane kao klasa) umetnute u područje koje predstavlja drugu klasu, što otežava i daljnju analizu i upotrebu satelitskoga snimka.

## 7. Literatura – References

Asner, G. P., M. Palace, M. Keller, R. Pereira Jr., J. N. M. Silva, J. C. Zweede, 2002: Estimating canopy structure in an Amazon forest from laser range finder and IKONOS satellite observations. *Biotropica*, 34 (4): 483–492.

Benko, M., V. Kušan, Z. Kalafadić, 1993: Satelitske snimke kao sastavni dio GIS-a šumarstva (*Satellite Images as Integral Part of Forestry GIS*), Radovi Šumarskog instituta, 28: 225–234.

Carneiro, C. M. R., 1980: Planimetric and thematic mapping potential of Landsat MSS imagery for integrated surveys of South Brazilian natural resources. *International archives of photogrammetry*, 23 (B7): 143–150.

Ceusters, A., R. Gomber, H. Gulinck, N. Sougnez, J. D. D. Hoore, 1978: Application of computer aided analysis of Landsat data to land use studies in Belgium. *International archives of photogrammetry*, 22 (7): 1497–1514.

Cihlar, J., L. C. Goodfellow, T. T. Alfoldi, 1980: Remote sensing technology transfer to operational use in canadian forestry. *International archives of photogrammetry*, 23 (B7): 162–172.

Clark, D. B., C. S. Castro, A. L. D. Alvarado, J. M. Read, 2004a: Quantifying mortality of tropical rain forest trees using high spatial resolution satellite data. *Ecology Letters*, 7 (1): 52–59.

- Clark, D. B., J. M. Read, M. L. Clark, A. M. Cruz, M. F. Dotti, D. A. Clark, 2004b: Application of 1-m and 4-m resolution satellite data to ecological studies of tropical rain forests. *Ecological Applications*, 14: 61–74.
- Čavlović, J., 2010: Prva nacionalna inventura šuma Republike Hrvatske (*The first national forest inventory in Croatia*). Ministarstvo regionalnog razvoja šumarstva i vodnoga gospodarstva i Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Franklin, S. E., R. J. Hall, G. S. Ghitler, 1995: Satellite remote sensing of spruce understories in deciduous and mixedwood stands. In Proc. Resource Technology '94 Symposium, Decision Support 2001 – Sept. 12–16, 1994, Toronto, str. 239–247.
- Franklin, S. E., R. J. Hall, L. Smith, G. R. Gerylo, 2003: Discrimination of conifer height, age, and crown closure classes using Landsat-5 TM imagery near Fort Simpson, Northwest Territories. *Int. J. Remote Sensing*, 24 (9): 1823–1834.
- Fuller, D. O., 2001: Forest fragmentation in Loudoun County, Virginia, USA evaluated with multitemporal Landsat imagery. *Landscape Ecol.*, 16: 627–642.
- Gerylo, G. R., R. J. Hall, S. E. Franklin, L. Smith, 2002: Empirical relations between Landsat TM spectral response and forest stands near Fort Simpson, Northwest Territories, Canada. *Can. J. Remote Sensing*, 28 (1): 68–79.
- Goetz, S. J., R. K. Wright, A. J. Smith, E. Zinecker, E. Schaub, 2003: IKONOS imagery for resource management: Tree cover, impervious surfaces, and riparian buffer analyses in the mid-Atlantic region. *Remote Sensing of Environment in IKONOS Fine Spatial Resolution Land Observation*, 88 (1–2): 195–208.
- Hagner, O., 2002: Combined estimation of forest parameters from high- and medium resolution satellite imagery and forest inventory data. In: Proceedings of the ForestSAT conference in Edinburgh Scotland, 5–9 August 2002.
- Hall, R. J., D. P., Davidson, D. R. Peddle, 2003: Ground and remote estimation of leaf area index in Rocky Mountain forest stands, Kananaskis, Alberta. *Can. J. Remote Sensing*, 29 (3): 411–427.
- Hall, R. J., R. V. Dams, L. N. Lyseng, 1991: Forest cutover mapping from SPOT satellite data. *Int. J. Remote Sensing*, 12 (11): 2193–2204.
- Jaskolla, F., A. Hirschheider, 1987: Operational application of remote sensing data in the framework of the CORINE Program. Proceedings of Willi Nordberg Symposium, Towards operational Cartographic Application, Graz, str. 169–175.
- Jensen, J. R., 2000. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Kalafadžić, Z., V. Kušan, 1991: Visoka tehnologija u inventuri šuma (High-tech in forest inventory). *Šumarski list*, 115 (11–12): 509–520.
- Kawamura, M., Y. Tsujiko, K. Tsujino, Sakai, T., 2004: Time-series fire-induced forest hazard mapping using Landsat and IKONOS imageries. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International, Vol 4: 2256–2259.
- Kayitakire, F., C. Hamel, P. Defourny, 2006: Retrieving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS – 2 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 102: 390–401.
- Klobučar, D., R. Pernar, 2009: Umjetne neuronske mreže u procjeni sastojinskih obrastat cikličkih snimaka (*Artificial neural networks in the estimation of stand density from cyclical aerial photographs*). *Šumarski list*, 133 (3–4): 145–155.
- Kovač, K., 2001: Primjena regresijskih modela za procjenu sastojinskih veličina na satelitskim snimkama (*Application of regression models to estimate stand size on satellite images*). Specijalistički rad, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Kušan, V., I. Lampek, 1994: Prilog istraživanju povećanja interpretabilnosti Landsat TM snimke za potrebe kartiranja korištenja zemljišta (*Contribution to investigation of improving interpretability of Landsat TM imagery for land use mapping*), 13: 41–51.
- Kušan, V., 1996: Kartiranje šuma pomoću Landsat TM satelitskih snimaka (*Mapping forests using Landsat TM images*). Disertacija, Zagreb.
- Kušan, V., R. Pernar, 2001: Primjena satelitskih snimaka za procjenu stanja sastojina (*Stand condition assessment on satellite images*). U: S. Matić I dr. (ur.), *Znanost o potrajnom gospodarenju hrvatskim šumama*, Šumarski fakultet Zagreb i Šumarski institut Jastrebarsko, Zagreb, str. 429–434.
- Lennartz, S. P, R. G. Congalton, 2004: Classifying and mapping forest cover types using High Resolution Multispectral Imagery. ASPRS Annual Conference Proceedings.
- Lillesand, T. M., R. W. Kiefer, 1994: *Remote sensing and image interpretation*. Third edition, John Wiley&Sons, Inc, New York.
- Lizarazo, I., 2006: Urban land cover and land use classification using high spatial resolution images and spatial metrics. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Workshop of the EARSeL SIG on Land Use and Land Cover, Bonn, 28–30 September 2006, str. 292–298.
- Maselli, F., 2004: Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multi-year NDVI data. *Remote Sens. Environ.*, 89: 423–433.
- Mäkelä, H, A. Pekkarinen, 2004: Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. *Forest Ecology and Management*, 196(2–3): 245–255.
- Oluić, M., 2001: Snimanje i istraživanje zemlje iz svemira (*Earth Imaging and Exploration from Space*). HAZU i GEOSAT d.o.o., Zagreb.
- Pejnović, T., 2000: Usporedba digitalne i vizualne interpretacije satelitske snimke za potrebe inventure šuma (*Comparison of digital and visual interpretation of satellite imagery for forest inventory*). Specijalistički rad, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Pernar, R., D. Šelendić, 2006: Prilog povećanju interpretabilnosti aerosnimaka i satelitskih snimaka za potrebe ure-

đivanja šuma (*A contribution to improved interpretability of aerial and satellite imagery in forest management*). Glas. šum. pokuse, pos. izd., 5: 467–477.

Read, J. M., D. B. Clark, E. M. Venticinqu, M. P. Moreira, 2003: Application of merged 1-m and 4-m resolution satellite data to research and management in tropical forests. *Journal of Applied Ecology*, 40: 592–600.

Seletković, A., R. Pernar, A. Jazbec, M. Ančić, 2008: Točnost klasifikacije satelitske snimke visoke prostorne rezolucije IKONOS za potrebe šumarstva (*Accuracy of high spatial resolution satellite images classification for forestry needs*). Šumarski list, 132 (9–10): 393–404.

Steven, M. D., T. J. Malthus, F. Baret, H. Xu, M. J. Chopping, 2003: Intercalibration of vegetation indices from dif-

ferent sensor systems, *Remote Sensing of Environment*, 88 (4): 412–422.

Vukelić, J., D. Baričević, S. Mikac, M. Rukavina, D. Tomljanić, 2006: Karta šumske vegetacije sjevernog Velebita (*Map of forest communities on Northern Velebit*). Glas. šum. pokuse, pos. izd., 5: 139–148.

Wastenson, L. T. Orhaug, S. I. Akersten, 1978: Swedish experience on forest inventory and landuse mapping by automatic classification of digital MSS dana from Landsat and aircraft. *International archives of photogrammetry*, 22 (7): 1475–1488.

Wulder, M. A., R. J. Hall, N. C. Coops, S. E. Franklin, 2004: High Spatial Resolution Remotely Sensed Data for Ecosystem Characterization. *BioScience*, 54 (6): 511–521.

---

## Abstract

---

### Assessment of Stand Structural Elements on the Basis of Spectral Reflectance Values of an IKONOS Satellite Image

*Rapid technological advances in the second part of the 20<sup>th</sup> century have brought about immense changes in data collection methods, especially in developed countries. In addition to standard terrestrial data collection methods, forest data are increasingly being collected with remote sensing methods. The application of remote sensing reduces the amount of field work and offers the possibility of saving time and money.*

*Satellite remote sensing is a very efficient method, while satellite images are a useful means for the surveillance and study of forest vegetation. Remote sensing is based on the prediction of the relationship between spectral reflectance and the observed variable. To interpret this kind of relationship, it is important to know the reflective characteristics of the target object (spectral features of vegetation, leaf, etc.), the size of area presentation (spatial resolution), and other factors such as topography, sun height, slope and orientation between the surveyed area and the survey sensor. A detailed and high quality analysis of satellite imagery, recognition and selection of certain data is highly dependent on image resolution, and especially on spatial resolution.*

*Acquiring information on forests from satellite photographs of high spatial resolution has been the subject of a large number of research activities. One of the approaches involves classification based on pixel value, or regression analyses in which spectral records are used to predict classes or continuous variables of stand structure.*

*The basic objective of this work is to explore the relationship between spectral reflectance recorded in the IKONOS satellite image of high spatial resolution and any individual stand parameter, as well as regression models for the evaluation of stand parameters.*

*The main material for this work was provided by the IKONOS satellite image of high spatial resolution for the Spačva basin area. The survey was conducted on 18 October 2006. An IKONOS satellite image of the Spačva basin with an area of 132 km<sup>2</sup> was delivered in 5 spectral channels: PAN (1x1m), and 4 MS Bundle. In the area of Vinkovci Forest Administration, within the management units encompassed by satellite surveying (MU Vrbanjske Šume, Kragujna, Slavir and Otočke Šume), field measurements were conducted in management classes of pedunculate oak and narrow-leaved ash through all age classes (2<sup>nd</sup> to 7<sup>th</sup> age class), for the purpose of subsequent comparison of interpretations and assessments of structural elements. Based on field measurements and Management Plan data, a database with compartments and subcompartments was established within two management units: Vrbanjske Šume and Slavir, where the largest number, 504 compartments in all, belong to the management class of pedunculate oak. For each compartment, the mean value of spectral reflectance within four channels was read from the satellite image. These read values were associated to the database mentioned earlier.*

*Descriptive statistics was performed for all the variables. In all the analyses, the significance level of 5% was considered statistically significant. Canonical correlation analysis was used to examine the relationship between a linear combination of channel value and a linear combination of field data value for each feature separately (number of trees, diameter at breast height, height, basal area and volume). Since there is no uniform solution, a linear combination should be selected which provides the best correlation among the monitored variables.*



The Pearson's correlation was used to study the relationship between arithmetic means of spectral reflectance values by channels and variables. The results of the assessment in the satellite image were compared with field measurement data, and with the data taken from the Management Plan. These data were used to generate the relationships between spectral reflectance recorded in the satellite image and a particular stand parameter, and consequently, the regression models for the assessment of stand parameters. Two regression models were assessed for each stand parameter within the management class of pedunculate oak, separately for each age class. The first model was assessed by means of the stepwise procedure, wherein the independent variables were the values of all four channels. A combination of the channels that best explains the dependent variable is selected. The second regression model contained a combination of all the four channels together (Table 2-6).

The best correlation between the observed variables and spectral values of individual channels was determined by means of canonical correlation.

Table 1 shows that canonical correlation for all the observed features in the third age class is higher than 0.9. In the third age class, the first canonical solution for the combination with four channels with the combination of tree number and correlation of 0.95 explains (overlaps) 90% of the variability. The poorest correlation of 0.46 proved to be for breast diameter and for all four channels in the sixth age class, with variability overlap of 21.19%. In terms of canonical correlation for tree number by all age classes, good correlations are observed in the 2<sup>nd</sup> (0.91), 3<sup>rd</sup> (0.95), and 5<sup>th</sup> (0.91) age class, where 80-90% of variability is explained. In contrast, correlation in the 6<sup>th</sup> and 7<sup>th</sup> age class was from 0.75 and 0.65, with determination coefficients of  $R^2 = 56.4\%$  and  $42\%$ . Very similar results were obtained for volume, where the poorest correlation was found in the 6<sup>th</sup> (0.69) and 7<sup>th</sup> (0.76) age class.

The results of canonical correlation analysis allow us to conclude that the observed variables are in good correlation with all the four channels for all age classes, except for age class 4, which cannot be assessed due to low spatial participation of this age class in the sample.

As for the possibility of stand parameter assessment in satellite images, the results of regression models for the third age class proved to be the best. These results relate to the number of pedunculate oak trees and the total number of trees, the total basal area and the total volume. In general, the results of regression model assessment for the third age class show that all the observed parameters (number of trees, breast diameter, height, basal area and volume) are very well assessed in models with all four channels and determination coefficients of 60% and 80%. Stand parameters of the second and fifth age class are also well assessed. It should be pointed out that, according to research results, there is no justification to assess stand parameters for all the observed variables in the sixth and seventh age class due to low values of determination coefficients.

Since data based on spectral information from pixels were used to assess stand structural elements, a possible cause of poorer assessment results of stand parameters for the 6<sup>th</sup> and 7<sup>th</sup> age class may be attributed to the spatial resolution of the IKONOS satellite image. Namely, images of high spatial resolution frequently show isolated pixels (classified as a class) inserted into the area that represents the second class, which makes further analysis and application of the satellite image more difficult.

*Keywords: IKONOS, spectral reflectance values, regression models, assessment of stand parameters*

---

#### Adresa autorâ – Authors' address:

Doc. dr. sc. Ante Seletković  
 e-pošta: aseletkovic@sumfak.hr  
 Prof. dr. sc. Renata Pernar  
 e-pošta: rpernar@sumfak.hr  
 Mario Ančić, dipl. inž. šum.  
 e-pošta: ancic@sumfak.hr  
 Jelena Sučić, dipl. inž. šum.  
 e-mail: jsucic@sumfak.hr  
 Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet  
 Zavod za izmjeru i uređivanje šuma  
 Svetošimunska 25  
 HR-10 000 Zagreb  
 Hrvatska