

PRIMJENA GEOSTATISTIKE U UREĐIVANJU ŠUMA

USING GEOSTATISTICS IN FOREST MANAGEMENT

Damir KLOBUČAR*

SAŽETAK: Cilj rada je istražiti i prikazati neke mogućnosti primjene geostatistike u uređivanju šuma u svrhu unaprjeđivanja dosadašnjeg pristupa korištenja i kartiranja podataka uređajne inventure šuma Republike Hrvatske. Geostatistička analiza podataka uređajne inventure šuma provedena je na dijelu gospodarske jedinice "Banov Brod", šumarije Pitomača za tri strukturalna elementa: broj stabala (N), temeljnicu (G) i obujam (V).

Kontinuirana karta raspodjele vrijednosti strukturalnih elemenata izrađena je metodom običnog kriginga i inverzne udaljenosti. Dobivene karte ukazuju da je procjenjivanje krigingom pouzdanije od metode inverzne udaljenosti. U radu je prikazana korisnost geostatističkih alata (semivariogramska površina, semivariogram, semivariogramski oblak) u analizi podataka uređajne inventure šuma i njihove prostorne zavisnosti. Geostatističkim pristupom može se promatrati bilo koja varijabla pridobivena tijekom uređajne inventure, po vrsti drveća ili ukupno, a omogućava svrsishodnije i racionalnije korištenje ovih informacija u prostoru i vremenu u svrhu boljeg gospodarenja šumama.

Glavne riječi: uređivanje šuma, uređajna inventura šuma, strukturalni elementi, geostatistika, kriging, semivariogram.

1. UVOD – Introduction

Danas su značajno unaprijeđene mogućnosti praćenja šuma, pomoću georeferenciranih karta (*engl. Georeferenced Map*), primjenom daljinskih istraživanja (*engl. Remote Sensing*), razvojem umjetne inteligencije (*engl. Artificial Intelligence*), uporabom globalnog pozicijskog sustava (*engl. Global Positioning System*) i geografskog informacijskog sustava (*engl. Geographic Information System*). Štoviše, točna pozicija (x , y) mjerenja (varijable) određenog obilježja (Z) u šumi omogućuje praćenje informacija i analizu tzv. kontinuiranoga modela prostorne varijacije, za razliku od diskretnog modela prostorne varijacije, koji pretpostavlja homogenost.

Od uvođenja geostatistike u geološke znanosti (Krig 1951, Matheron 1965), ona se primjenjuje u mnogim područjima čiji je interes analiza prostornih podataka. Danas je geostatistika postala prihvaćena znanstvena metoda prostorne analize, bez obzira na dimenziju prostora u kojemu se promatrani proces nalazi i

na varijablu koja se obrađuje (Andričević et al. 2007). Geostatistika se temelji na konceptu regionalizirane varijable (što znači da vrijednost varijable zavisi od mjesta uzorkovanja). Dio je primijenjene statistike usmjerene na opisivanje prostornih podataka (uzoraka) i procjenjivanje vrijednosti na neuzorkovanim lokacijama. Geostatistički pristup pretpostavlja da odnosi između podataka uzorkovanja ovise samo o njihovom prostornom odnosu (prostornoj lokaciji), kao što su udaljenost i smjer. Za prostorno bliže uzorke, varijacije su pretpostavljeno manje nego li kada se uspoređuju prostorno udaljeniji uzorci (princip prostorne autokorelacije).

Dok statističke analize prostornih podataka uzimaju vrijednost na lokaciji za vanjskog (eksternog) čimbenika, prostorna analiza prepoznaje lokaciju kao svojstvo i logičnu povezanost u prostornoj interakciji podataka. Stoga je prostorna analiza koristan alat u istraživanju prirodnih resursa (Payn i dr. 1999).

Akhavan i Zobeiri (2007) navode da je prvo istraživanje primjene geostatistike u inventuri šuma učinio Guibal (1973) u procjeni drvne zalihe tropskih

* Dr. sc. Damir Klobučar, znanstveni suradnik,
"Hrvatske šume" d.o.o., Lj. F. Vukotinovića 2, 10 000 Zagreb,
e-mail: damir.klobucar@hrsume.hr

šuma Gabona. Od tada su načinjena i druga istraživanja u pogledu primjene geostatistike u inventuri šuma, procjeni sastojinskih parametara i utvrđivanju njihovog međusobnog prostornog odnosa.

Mandalaz (1993) koristi geostatistiku u određivanju veličine uzorka švicarske nacionalne inventure, te primjenom kriginga bez utjecaja na točnost, veličinu uzorka smanjuje za 30 %. Biondi i dr. (1994) provode geostatističko modeliranje promjera, temeljnice, kao i periodičkog prirasta temeljnice u zrelim sastojinama žutog bora (*Pinus ponderosa* Dougl.) u SAD. Gunnarson i dr. (1998) u Švedskoj istražuju mogućnosti primjene geostatistike u uređivanju šuma. Uuttera i dr. (1998) primjenjuju variogram u uspoređivanju šuma (koriste nekoliko obilježja) prema vlasništvu u Finskoj. U dijelu ciriškog kantona, Mandalaz (2000) daje primjer primjene metode krigina u inventuri šuma. Stendahl (2001) u Švedskoj geostatističkim pristupom istražuje unutar sastojinsku varijabilnost crnogoričnih sastojina različite starosti i stupnja razvoja. Koristeći podatke nacionalne inventure šuma Španjolske (NFI-2) u šumama primorskog bora (*Pinus pinaster* Ait.) geostatističku predikciju distribucije promjera provode (Nanos i Montero, 2002), odnosno predikciju visina / promjer modela (*engl. height/diameter models*) istražuju Nanos i dr. (2004). Tuominen i dr. (2003) u Finskoj, koriste daljinska istraživanja, podatke ranijih inventura i geostatističku interpolaciju u iznalaženju metoda koje će unaprijediti točnost procjenjivanja varijabli. U istočnoj Španjolskoj, Montes i dr. (2005) geostatističkim pristupom analiziraju produkciju hrasta plutnjaka (*Quercus*

suber L.). Akhavan i Zobieri (2007) primjenjuju obični kriging u procjeni drvene zalihe u Kaspijskom području. Palmer i dr. (2009) uspoređuju četiri interpolacijske tehnike u procjeni produktivnosti (produktivnosti) kalifornijskog bora (*Pinus radiata* Don.) za područje Novog Zelanda.

Provedena su istraživanja i u drugim područjima šumarstva: daljinska istraživanja (Franklin i dr. 1992, Bowers i dr. 1994, Lévesque i King 1999, Zawadzki i dr. 2005), entomologija (Liebhold i dr. 1993), produkcija i ishrana (Payn i dr. 1999), procjena oštećenosti šuma (Köhl i Gertner 1997, Seidling i dr. 2000), pedologija (Borůvka i dr. 2005), analiza primjene kriginga u interpolaciji distribucije vrsta s ICP ploha (Tröltzsch i dr. 2009).

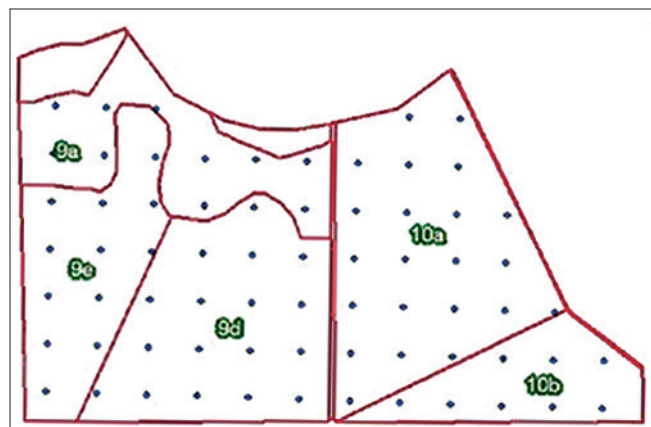
Cilj ove geostatističke analize numeričkih podataka je istraživanje i prikaz nekih mogućnosti primjene geostatistike u uređivanju šuma, a u svrhu unaprjeđivanja dosadašnjeg pristupa korištenja i kartiranja podataka uređajne inventure šuma Republike Hrvatske. Geostatistička analiza provedena je na dijelu gospodarske jedinice "Banov Brod", šumarije Pitomača za tri strukturna elementa: broj stabala (N), temeljnicu (G) i obujam (V). Analizom tih podataka odredili bi se: anizotropija izradom karata semivariogramske površine, eksperimentalni semivariogrami, teorijski semivariogrami, usporedili eksperimentalni i teorijski semivariogrami, analizirane varijable kartirale tehnikom običnog kriginga te inverzne udaljenosti, usporedile karte dobivene metodama kriginga i inverzne udaljenosti, primjenjivost izrade semivariogramskog oblaka u prostornoj analizi podataka.

2. MATERIJAL I METODE – Material and methods

Istraživanje je provedeno na području UŠP Koprivnica, šumarije Pitomača, gospodarske jedinice "Banov Brod". Istraživanjem su obuhvaćeni odjeli/odsjeci 9 a, d, e, te 10 a, b (slika 1.), ukupne površine 69, 57 ha.

Upotrijebljeni su podaci izmjere šuma sa sustavno položenih ploha (100 x 100 m) (slika 1). Na svakoj plohi stabla prsnog promjera 10–29 cm mjerena su na krugu polumjera 5,0 m (78, 5 m²), a stabla prsnog promjera 30 cm i više mjerena su na krugu polumjera 12,0 m (452, 16 m² ≈ 0,05 ha).

Slika 1. Prostorni raspored primjernih ploha
Figure 1 Spatial arrangement of sampling plots



Tablica 1. Elementi strukture istraživanih sastojina
Table 1 Structural elements of the research stands

Odsjek <i>Subcompartment</i>	Površina (ha) <i>Area (ha)</i>	Broj stabala (ha) <i>Trees number (ha)</i>	Temeljnica (m ² /ha) <i>Basal area (m²/ha)</i>	Obujam (m ³ /ha) <i>Volume (m³/ha)</i>
9a	10,68	529	32,72	403
9d	17,70	498	26,38	323
9e	11,95	503	27,60	334
10a	21,20	494	29,43	369
10b	8,04	452	31,46	405

Za plohe polumjera 5 m broj stabala je projiciran na površinu kruga polumjera 12 m, te su dobiveni podaci o broju stabala i temeljnici. Drvna zaliha za pojedinu plohu je izračunata na temelju utvrđenog tarifnog niza. Ukupan broj ploha je 69.

Iz tablice 1 uočljivo je da se vrijednosti strukturnih elemenata nalaze u rasponu od 323 do 405 m³ za obujam po hektaru, odnosno 452 do 529 za broj stabla po hektaru, te za temeljnicu od 26,38 do 32,72 m² po hektaru.

Geostatističkim pristupom (Isaaks i Srivastava 1989, Goovaerts 1997, Andričević i dr. 2007, Malvić 2008) analizirana su tri uzorkovana strukturna elementa (tri varijable): obujam, broj stabala i temeljnica.

U svrhu određivanja anizotropije najprije su izrađene karte semivariogramskih površina za svaki od navedenih elemenata. Semivariogram je korišten kao mjera prostorne ovisnosti između izmjerenih točaka, te su izračunati eksperimentalni i teorijski semivariogrami. Eksperimentalni semivariogram za svaki strukturni element dobiven je nakon višekratnog ispitivanja veličine koraka. Iz modela teorijskih semivariograma dobiveni su parametri koji su korišteni za interpolaciju običnim krigingom određenog strukturnog elementa, te je izrađena kontinuirana karta raspodjele vrijednosti strukturnih elemenata.

Provedena je i interpolacija strukturnih elemenata metodom inverzne udaljenosti (*engl. inverse distance*). Kod metode inverzne udaljenosti vrijednost u odabranim točkama se procjenjuje na temelju jednostavnog matematičkog izraza, gdje je utjecaj svake točke obra-

tno proporcionalan njezinoj udaljenosti od lokacije na kojoj se procjenjuje vrijednost.

Testiranje modela interpolacije provedeno je primjenom numeričke metode krosvalidacije (*engl. cross-validation*). Metoda se temelji na uklanjanju vrijednosti mjerene na odabranom mjestu i određivanje nove vrijednosti na istome mjestu, uzevši u obzir preostale podatke. Postupak se ponavlja za sve lokacije i na kraju se izračuna korijen srednje kvadratne pogreške (*engl. root mean square error, abbr. RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(izmj.vrij(x_i) - proc.vrij.)^2]}$$

gdje je:

RMSE – srednja kvadratna pogreška (krosvalidacija) procjene odabrane metode

izmj.vrij. – izmjerena vrijednost odabrane varijable

proc.vrij. – procijenjena vrijednost odabrane varijable

Takva vrijednost izračunata je za karte dobivene kako metodom kriginga, tako i inverzne udaljenosti.

Provedeno je i dodatno testiranje modela interpolacije primjenom analize varijance ponovljenih mjerenja.

Na kraju, prikazana je korisnost izrade semivariogramskog oblaka (*engl. semivariogram cloud*) u prostornoj analizi strukturnih elemenata.

U radu su korištena tri programa: VARIOWIN 2.21 (Pannatier 1996, slobodni program), SURFER 8.0TM (licencirani program) i STATISTICA 7.1TM (licencirani paket).

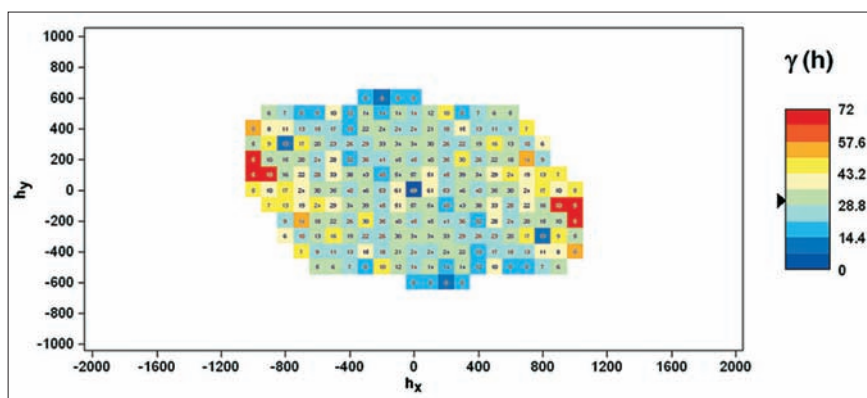
3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA – Research results

Karte semivariogramskih površina za tri analizirana strukturna elementa nisu ukazivale na postojanje anizotropije. Na slici 2. prikazana je karta semivariogramske površine obujma na kojoj se slabo ukazuje anizotropija u smjeru SZ – JI.

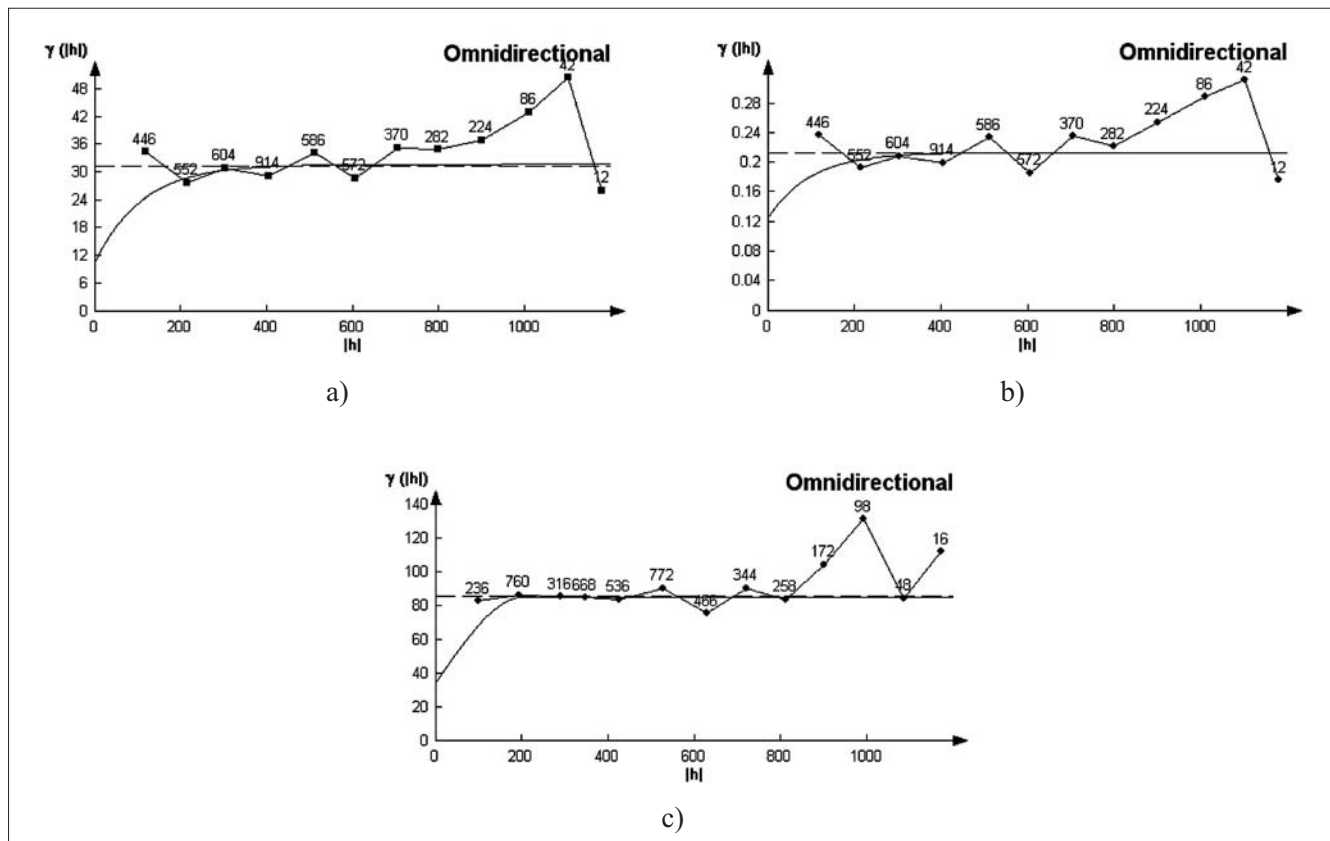
Kako nije utvrđena anizotropija, nakon testiranja veličine koraka (*engl. lag distance*) izračunat je eksperimentalni neusmjereni semivariogram za udaljenost koraka od

100 m kod semivariograma obujma i temeljnice, odnosno 90 m kod semivariograma broja stabala (slika 3).

Svi eksperimentalni semivariogrami mogu se smatrati pouzdanim, jer sadrže velik broj parova podataka. Zajedničko im je i postojanje velikog odstupanja (*engl. nugget*), tj. razlike u vrijednostima bliskih uzoraka ili same pogreške mjerenja, kao i doseg, koji je veći od intervala uzorkovanja. Naime, u slučaju da je doseg manji od intervala uzorkovanja, rješenje se mora tražiti u većem broju uzoraka na manjoj udaljenosti. Eksperimentalni neusmjereni semivariogrami obujma i temeljnice počinju vrlo brzo pravilno oscilirati, čime pokazuju da je doseg (kružnica, elipsoid) prostorne autokorelacije relativno mali (slike 3a, b). Najmanji doseg (prostorna korelacija) je izračunat za broj stabala. Eksperimentalni neusmjereni semivariogram broja stabala relativno brzo raste, te ovaj strukturni element pokazuje slabiju



Slika 2. Karta semivariogramske površine obujma s brojevima parova podataka
Figure 2 Semivariogram surface map of tree volume with numbers of data pairs



Slika 3. Eksperimentalni (s brojem parova podataka) i teorijski semivariogrami; a) obujma, b) temeljnice, c) broja stabala
 Figure 3 Experimental (with number of data pairs) and a theoretical semivariograms; volume, b) basal area, c) tree number

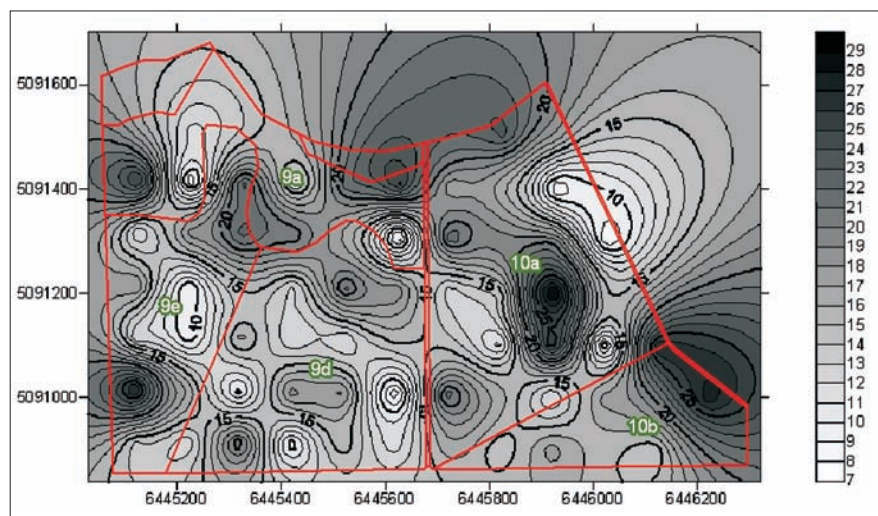
Tablica 2. Vrijednosti teorijskih semivariograma za analizirane strukturne elemente
 Table 2 Theoretical semivariograms values for analyzed structural element

Strukturni element-Structure element	Model-Model	Odstupanje-Nugget	Doseg-Range	Prag-Sill
Obujam (m ³ /0,05ha) Volume (m ³ /0,05ha)	Eksponecijalni	10,56	324	32,82
Temeljnica (m ² /0,05ha) Basal area (m ² /0,05ha)	Eksponecijalni	0,13	294	0,21
Broj stabala (/0,05ha) Trees number (/0,05ha)	Sferični	34,4	204	85,14

prostornu korelaciju (slika 3c), kao i temeljnica koja ima veći doseg, ali i odstupanje.

Eksperimentalni semivariogrami aproksimirani su teorijskim (slika 3). Modeli teorijskih semivariograma po strukturnim elementima s pripadajućim vrijednostima prikazani su u tablici 2.

Kod modela teorijskih semivariograma, najveće odstupanje dobiveno je kod temeljnice (61 % praga), dok je ovaj udio manji kod broja stabala (40 %), odnosno za obujam (32 %). Parametri (model, prag, doseg) u tablici 2. korišteni su za izračun matrica kriginga, odnosno težinskih



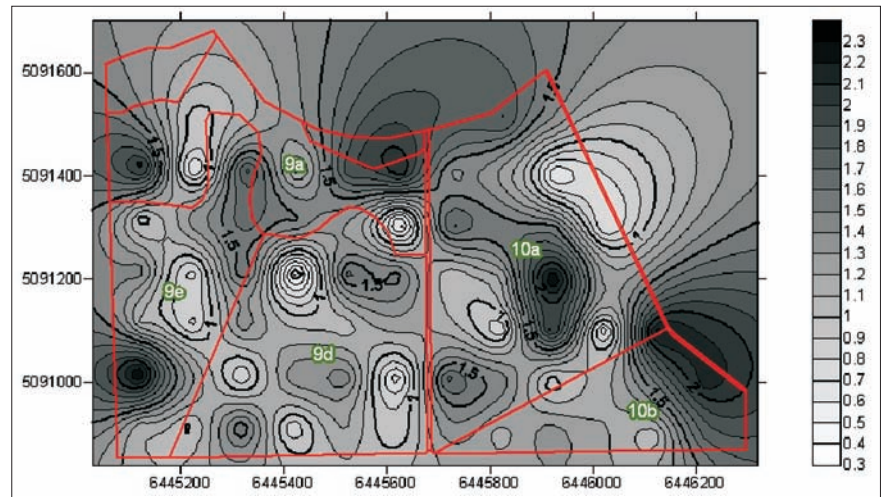
Slika 4. Karta prostorne raspodjele uzoraka obujma
 Figure 4 Map of the spatial distribution of volume samples

koeficijenta koji pripadaju mjernim podacima. Na taj je način običnim krigingom dobivena karta prostorne raspodjele obujma (slika 4), temeljnica (slika 5) i broja stabala (slika 6).

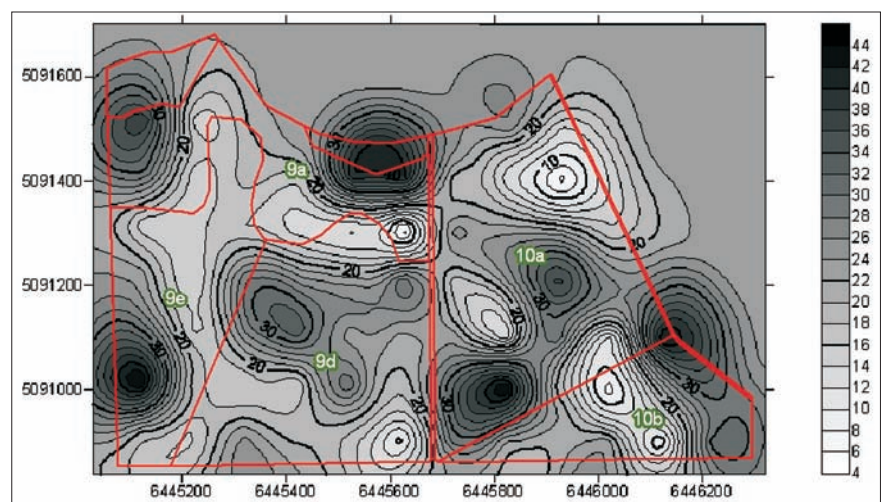
Karte raspodjele (slike 4, 5, 6) predstavljaju procijenjenu vrijednost strukturalnih elemenata na bilo kojoj koordinati (x, y). Iz predočenih procjena (karata) razvidna je nejednoličnost na razini pojedinog odsjeka. Prostorni raspored pojedinog strukturalnog elementa (kartirane varijable), odnosno njegovu nejednoličnu prostornu strukturu nije moguće uočiti iz zbirnih podataka terenske izmjere, koji pretpostavljaju homogenost i jedinstvenu vrijednost na cijeloj površini odsjeka/odjela (tablica 3).

Procjene strukturalnih elemenata metodama kriginga i inverzne udaljenosti testirane su krosvalidacijom, a kao mjera točnosti procjene korišten je korijen srednje kvadratne pogreške (tablica 4).

Srednje kvadratne pogreške metoda procjene vrlo su slične (neznačajno manje kod metode inverzne udaljenosti) i na temelju njih nije moguće zaključiti koja je interpolacijska tehnika prihvatljivija. Stoga je primjenom analize varijance ponovljenih mjerenja provedeno testiranje



Slika 5. Karta prostorne raspodjele uzoraka temeljnica
Figure 5 Map of the spatial distribution of basal area samples



Slika 6. Karta prostorne raspodjele uzoraka broja stabala
Figure 6 Map of the spatial distribution of tree number samples

Tablica 3. Srednje vrijednosti uzoraka istraživanih sastojina (Osnova gospodarenja)

Table 3 Means of samples' values of the research stands (Management Plan)

Odsjek <i>Subcompartment</i>	Broj stabala (/0,05ha) <i>Trees number (/0,05ha)</i>	Temeljica (m ² /0,05ha) <i>Basal area (m²/0,05ha)</i>	Obujam (m ³ /0,05ha) <i>Volume (m³/0,05ha)</i>
9a	24	1,48	18
9d	23	1,19	15
9e	23	1,25	15
10a	22	1,33	17
10b	20	1,42	18

Tablica 4. Statistika procjene metodom kriginga (K) i metodom inverzne udaljenosti (IU)

Table 4 Assessment statistics through kriging method (K) and inverse distance method (ID)

Strukturalni element <i>Structure element</i>	Sredina <i>Average</i>		Min. <i>Min.</i>		Mak. <i>Max.</i>		Mak – Min. <i>Max – Min.</i>		SD <i>SD</i>		CV <i>CV</i>		RMSE <i>RMSE</i>	
	K	IU-ID	K	IU-ID	K	IU-ID	K	IU-ID	K	IU-ID	K	IU-ID	K	IU-ID
Obujam (m ³ /0,05ha) <i>Volume (m³/0,05ha)</i>	16,37	16,30	10,14	13,87	22,27	18,93	12,13	5,06	2,87	1,15	0,18	0,07	6,87	5,79
Temeljica (m ² /0,05ha) <i>Basal area (m²/0,05ha)</i>	1,31	1,30	0,84	1,12	1,80	1,50	0,96	0,38	0,23	0,09	0,17	0,07	0,56	0,49
Broj stabala (/0,05ha) <i>Trees number (/0,05ha)</i>	22	22	14	18	33	25	19	7	4,76	1,37	0,22	0,06	9,69	9,73

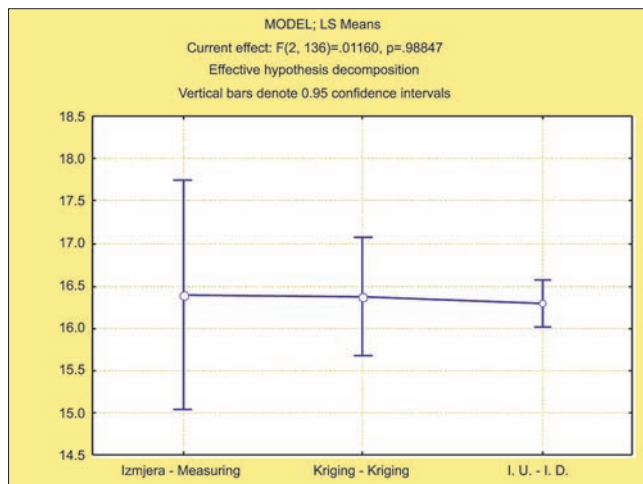
* SD–Standardna Devijacija/Standard Deviation, CV–Koefficient varijacije/Coefficient of Variation

razlike u vrijednostima između podataka izmjere i interpoliranih vrijednosti tri strukturalna elementa (obujam, temeljnica i broj stabala). Vidljivo je (tablica 5) kako statistički značajna razlika između podataka izmjere i interpolacijskih metoda kriginga i inverznih udaljenosti nije utvrđena.

Kod procjene vrijednosti strukturalnih elementa (tablica 4, slike 7, 8, 9) razvidna je visoka podudarnost aritmetičkih sredina interpolacijskih modela sa srednjom vrijednošću izmjere za sva tri strukturalna elementa. Također je uočljivo da procjena krigingom ima veću podudarnost s rasponom vrijednosti izmjere za sva tri strukturalna elementa, dok procjene meto-

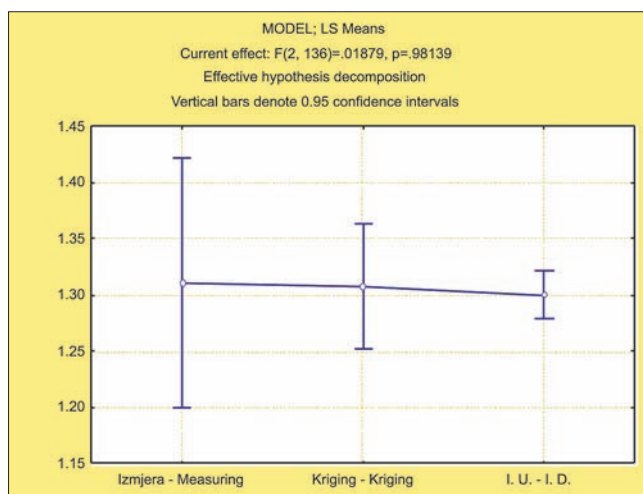
Tablica 5. Rezultati analize varijance ponovljenih mjerenja
Table 5 Results of repeated measures analysis of variance

G. J. "Banov Brod" – M. U. "Banov Brod"					
Obujam – Volume (m ³ /0,05ha)					
	SS	df	MS	F	p
Intercept	55368,06	1	55368,06	4536,977	0,000000
Error	829,85	68	12,20		
MODEL	0,34	2	0,17	0,012	0,988473
Error	1991,51	136	14,64		
Temeljnica – Basal area (m ² /0,05ha)					
Intercept	353,2203	1	353,2203	4577,278	0,000000
Error	5,2474	68	0,0772		
MODEL	0,0037	2	0,0019	0,019	0,981391
Error	13,4154	136	0,0986		
Broj stabala – Trees number (0,05ha)					
Intercept	100176,8	1	100176,8	2410,262	0,000000
Error	2826,3	68	41,6		
MODEL	1,7	2	0,8	0,023	0,976781
Error	4816,6	136	35,4		



Slika 7. Aritmetičke sredine i 95 %-tni intervali pouzdanosti obujma za izmjeru, kriging i inverznu udaljenost

Figure 7 Means and 95% confidence intervals of volume for measurement, kriging and inverse distance



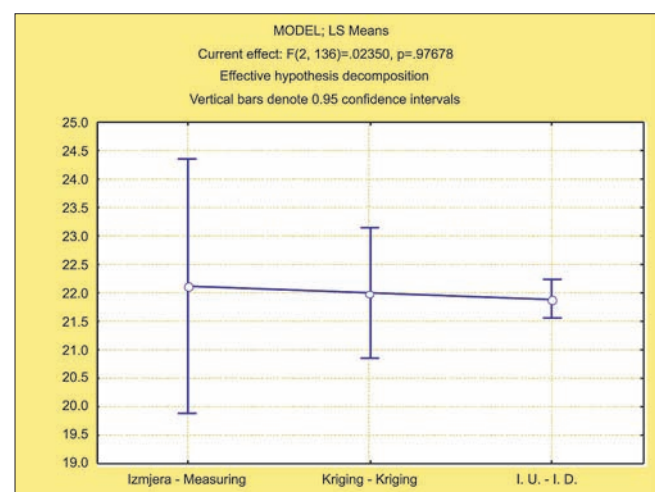
Slika 8. Aritmetičke sredine i 95 %-tni intervali pouzdanosti temeljnica za izmjeru, kriging i inverznu udaljenost

Figure 8 Means and 95% confidence intervals of basal area for measurement, kriging and inverse distance

dom inverzne udaljenosti imaju znatno manji raspon vrijednosti (odnosno procjena u ćelijama modela se više kreće oko srednje vrijednosti ulaznih podataka). Stoga se u ovom istraživanju kriging smatra prihvatljivijom interpolacijskom metodom u odnosu na metodu inverzne udaljenosti.

Rezultati krosvalidacije mogu se smatrati očekivanim u smislu neprocjenjivanja referentnih (izmjenjenih) malih i velikih vrijednosti strukturalnih elementa. Naime, rezultati interpolacije imaju manji raspon vrijednosti. Razlog je da su referentno manje vrijednosti precjenjivane (*engl. overestimate*), odnosno da su veće referentne vrijednosti podcijenjene (*engl. underestimate*), a broj interpoliranih točaka znatno je veći od točaka s mjernim vrijednostima, pa se taj učinak osjetio.

Izrada semivariogramskog oblaka koristan je postupak (alat) jer je na interaktivnom sučelju omogućeno promatranje razlika pojedine varijable (strukturalnog ele-



Slika 8. Aritmetičke sredine i 95 %-tni intervali pouzdanosti broja stabala za izmjeru, kriging i inverznu udaljenost

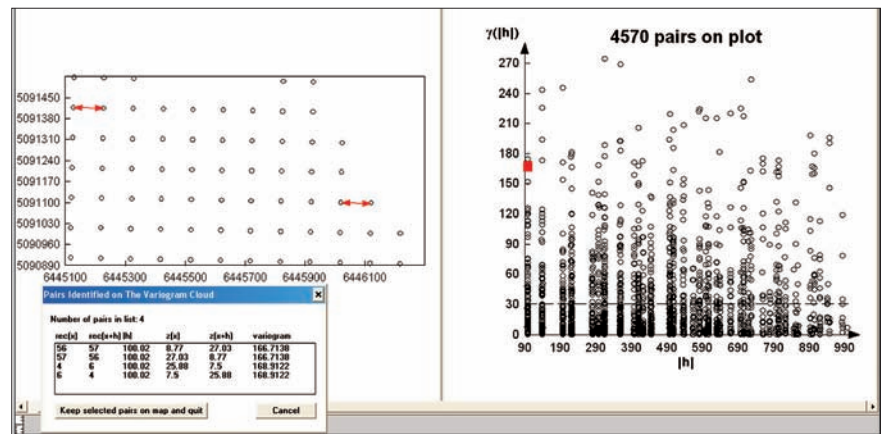
Figure 9 Means and 95% confidence intervals of tree number for measurement, kriging and inverse distance

* I. U. – Inverzna udaljenost, I. D. – Inverse distance

menta) kao funkciju udaljenosti (prikazane na apscisi) između mjerenih podataka (na ordinati se nalaze semivariogramske vrijednosti između parova) u analiziranom prostoru (prikaz šumskoga područja s lokacijama na kojima su postojala mjerenja). Kao što je vidljivo iz primjera (slika 10) prostorno bliske točke imaju značajne razlike u obujmu.

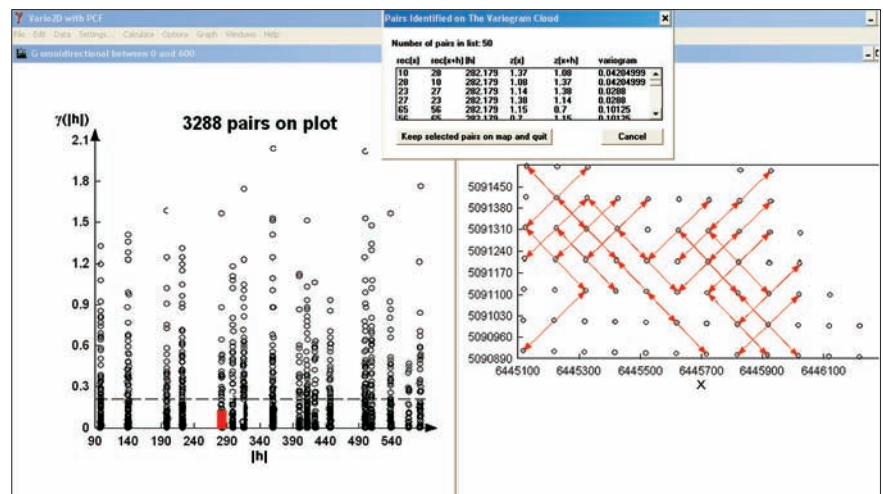
U drugom primjeru (slika 11) na većoj udaljenosti uočljiva je homogenost (male semivariogramske razlike) u temeljnici kod većeg broja primjernih ploha.

Slučajno odabrani primjer (slika 11) i njegovo tumačenje odgovara stvarnom stanju istraživanog područja, odnosno podacima izmjere. Naime, svojstva mjerenih varijabli (u primjeru temeljnica) slična su i na većim udaljenostima unutar analizirane šumske površine. Znači da je varijanca vrlo reprezentativan ulazni skup, a prostorna korelacija bližih mjerenja tek nešto bolja od iste vrijednosti za mjerenja koja su apsolutno udaljenija.



Slika 10. Semivariogramski oblak obujma (1. primjer)

Figure 10 Volume semivariogram cloud (example 1)



Slika 11. Semivariogramski oblak temeljnice (2. primjer)

Figure 11 Basal area semivariogram cloud (example 2)

4. RASPRAVA – Discussion

Prema Pravilniku o uređivanju šuma (NN 111/06; NN 141/08) podaci o strukturnim elementima pridobivaju se terenskom izmjerom na primjernim površinama. Elementi strukture sastojine iskazuju se prema vrstama drveća po hektaru i ukupno, posebice za svaki odsjek. Kartiranje strukturnih elemenata nije predviđeno.

Naime, danas se prilikom provođenja uređajne inventure na primjernim ploham izmjere vrijednosti strukturnih elemenata i za te plohe GPS uređajem odrede koordinatna središta. Poslije se u obradi prostorne informacije (podaci o koordinatama primjerenih površina s pripadajućim mjernim obilježjima) ne koriste, već se na sastojinskoj razini (odsjek/odjel) provodi osrednjavanje svih primjernih ploha. Stoga nije moguće analizirati njihovu prostornu ovisnost (korelaciju), niti je moguće izraditi kartu strukturnog elemenata ili bilo kojeg drugog obilježja. Dakle, pristup osrednjavanja na sastojinskoj razini ima u tom pogledu nedostatke. S druge strane jasno je da izrada kontinuiranog modela (karte) koji bi u potpunosti ispravno (točno) prikazivao prostornu strukturu i stanje šume, nemoguće.

No, karta ima svrhu poopćiti i sažeti uz zadržavanje pouzdanosti. Ma kakva bila njihova svrha, karte i modeli moraju svijet pojednostaviti jednako toliko koliko ga odražavaju (Gleick 1996).

Intenzivnim gospodarenjem (sječe, građenje šumskih prometnica i sl.) čovjek uzrokuje nagle promjene u šumi. Promjenama u većoj ili manjoj mjeri doprinose i poremećaji uzrokovani bolestima, insektima, elementarnim nepogodama (požari, izvale i sl.), kao i naposljetku zajedničko djelovanje većeg broja nepovoljnih čimbenika koji uzrokuju propadanje šuma. Jasno, te promjene utječu na određeno obilježje (strukturni element) u smislu njegovog ponašanja kao regionalizirane varijable. Naravno, uz navedeno u obzir treba uzeti i utjecaj fiziografskih i topografskih značajki određenog područja. S druge strane, uzgojni zahvati ujednačavaju sastojinu (npr. sječom podrasta, predrasta, gospodarski nepoželjnih vrsta), odnosno umanjuju sastojinsku varijabilnost. Zato se smatra da bi geostatistički pristup imao najbolje rezultate u prostornoj analizi obilježja, čije se vrijednosti u prostoru mijenjaju postupno (Tuominen i dr. 2003, Akhavan i Zobeiri 2007).

Nadalje, u gospodarskim šumama, veličina odsjeka/odjela je u funkciji prostorne korelacije. Naime, pri likom inventure šuma, kada je srednja udaljenost između primjernih ploha (uzoraka) manja od veličine odsjeka/odjela (kao u primjeru), podaci će, uglavnom, biti prostorno korelirani. Gunnarsson i dr. (1998) navode da sastojinske varijable: ukupna drvena zaliha, godišnji volumni prirast, srednji promjer i starost, uglavnom pokazuju pozitivnu autokorelaciju unutar dosega od nekoliko stotina metara. I u ovom istraživanju utvrđene su navedene postavke, odnosno prostorna korelacija obujma, temeljnica i broja stabala u dosegu od nekoliko stotina metara.

Interpolacija blizu granica odsjeka/odjela dijelom je problematična zbog mogućih naglih promjena vrijednosti varijabli (Gunnarsson i dr. 1998, Nanos i Montero 2002).

Određivanje koordinatnog središta primjernih ploha korištenjem GPS može utjecati na pouzdanost interpoliranih karata. Naime, treba težiti da informacija o sastojini bude povezana sa što točnijim koordinatnim vrijednostima (mjestom u šumi na koje se odnosi informacija), odnosno da određivanje koordinata ima što manje odstupanje.

U slučaju lošije procjene krigingom (tj. kada postoje metode koje daju primjerenije karte), geostatistički pristup i dalje daje velik broj informacija. Tada je obilježje (strukturni element) koje pokazuje slabu prostornu korelaciju, odnosno veliku varijabilnost na maloj udaljenosti, moguće utvrditi analizom semivariogramskog oblaka (velike semivariogramske razlike na maloj udaljenosti) ili semivariograma (veliko odstupanje, mali doseg).

Opisivanje varijabli i procesa ovisi od intenziteta uzorkovanja, tj. skale na kojoj je provedeno mjerenje.

5. ZAKLJUČCI – Conclusions

Na temelju provedenog istraživanja može se zaključiti da geostatistički pristup omogućava naprednu analizu i kontrolu podataka uređajne inventure šuma u prostoru (struktura, korelacija) i vremenu (praćenje gospodarenja). Kontinuirane karte raspodjele vrijednosti strukturnih elemenata (obujam, temeljnica, broj stabala) izrađene su metodom običnog kriginga i inverzne udaljenosti. Dobivene karte i statističke analize ukazuju da je procjenjivanje krigingom pouzdanije od metode in-

Naime, u geostatistici veličina prostora i obilježje (varijabla) nije ograničavajući element (Malvić 2008). Stoga se geostatistički pristup u uređajnoj inventuri šuma može primjenjivati na veličini (površini) jedne ili većeg broja primjernih ploha, odsjeka/odjela, manjeg (kao u ovom istraživanju) ili većeg dijela gospodarske jedinice, odnosno na razini gospodarske jedinice, kao i pri regionalnim ili nacionalnim inventurama. Geostatističkim pristupom može se promatrati bilo koja varijabla pridobivena tijekom uređajne inventure, po vrsti drveća ili ukupno. Jedini uvjet je da se između njih pretpostavi nekakav oblik autokorelacije.

Prilagodljivo gospodarenje (*engl. adaptive management*) šumskim ekosustavima je nemoguće bez njihovog praćenja. Izostanak ili nezadovoljavajuće praćenje dovode do neispravnih zaključaka koji generiraju pogrešne gospodarske aktivnosti. Analiza i vrednovanje uspješnosti dosadašnjeg gospodarenja iznimno je bitna za buduće gospodarenje šumama (Bončina i Čavlović, 2009).

Budući da se uređajna inventura provodi periodički, geostatistički pristup uz mogućnost praćenja šuma u prostoru (prostorna struktura), daje mogućnost praćenja šuma i u vremenu. Na taj se način, kontinuiranim kartiranjem dvije ili više sukcesivnih izmjera, može pratiti kretanje varijable(i) u vremenu i prostoru (kretanje vrijednosti strukturnih elemenata po vrstama drveća i ukupno, zdravstveno stanje šuma i dr.), kao i samo gospodarenje. Uz navedeno, opisani pristup omogućuje i kontrolu izmjere šuma.

Uređajnom inventurom pridobivaju se brojne informacije o stanju šuma. Geomatematički alati (geostatistički i neuronski), omogućavaju svrsishodnije i racionalnije korištenje ovih informacija u prostoru i vremenu u svrhu boljeg gospodarenja šumama.

verzne udaljenosti. Karta semivariogramske površine, semivariogram, semivariogramski oblak korisni su geostatistički alati u analizi podataka uređajne inventure šuma i njihove prostorne zavisnosti. Provedenom geostatističkom analizom za sva tri strukturna elementa utvrđena je prostorna korelacija.

Mogućnosti primjene geomatematičkih alata (geostatistički i neuronski) u uređivanju šuma nisu dovoljno istražene, što je cilj budućeg rada.

6. LITERATURA – References

- Akhavan, R., M. Zobeiri, 2007: Application of geostatistics for estimation of forest growing stock in the Caspian region of Iran. A review of forests, wood products and wood biotechnology of Iran and Germany, 102–111. Göttingen.
- Andričević, R., H. Gotovac, I. Ljubenković, 2007: Geostatistika: Umijeće prostorne analize. Split.
- Biondi, F., D. E. Myers., C. C. Avery, 1994: Geostatistically modeling stem size and increment

- in an old-growth forest. *Can. J. For. Res.* 24: 1354–1368.
- Bončina, A., J. Čavlović, 2009: Perspectives of Forest Management Planning: Slovenian and Croatian Experience. *Croatian Journal of Forest Engineering* 1: 77–87.
- Borůvka, L., L. Mládková, O. Drábek, R. Vašát, 2005: Factors of spatial distribution of forest floor properties in the Jizerské Mountains. *Plant soil environ.*, 51 (10): 447–455.
- Bowers, W., S., Franklin, J. Hudak, G. J. McDermid, 1994: Forest structural damage analysis using image semivariance. *Canadian Journal of Remote Sensing* 20: 28–36.
- Franklin, S. E., W. Bowers, J. Hudack, G. J. McDermid, 1992: Estimating structural damage in balsam fir stands using image semivariance. In *Proceedings of the 15th Canadian Symposium on Remote Sensing*, British Columbia, 96–99, Vancouver.
- Gleick, J., 1996: *Kaos: stvaranje nove znanosti*, Zagreb.
- Goovaerts, P., 1997: *Geostatistics for natural resources evaluation (applied Geostatistics Series)*. New York.
- Guibal, D., 1973: *L' estimation des oukoumés du Gabon*, note interne 333, centre de Morphologie Mathématique, Fontainebleau, France.
- Gunnarsson, F., S. Holm, P. Holmgren, T. Thuresson, 1998: On the Potential of Kriging for Forest Management Planning. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13: 237–245.
- Isaaks, E., R. Srivastava, 1989: *An Introduction to Applied Geostatistics*, New York.
- Köhl, M., G. Gertner, 1997: Geostatistics in evaluating forest damage surveys: considerations on methods for describing spatial distributions. *Forest Ecology and Management* 95, 131–140.
- Krige, D. G., 1951: *A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand*. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 52, 119–139.
- Lévesque, J., D. J. King, 1999: Airborne digital camera image semivariance for evaluation of forest structural damage at an acid mine site. *Remote Sensing of Environment* 68: 112–124.
- Liebold, A. M., R. E. Rossi, W. P. Kemp, 1993: Geostatistics and Geographic Information System in Applied Insect Ecology. *Annual Review of Entomology*, 38: 303–327.
- Malvić, T., 2008: *Primjena geostatistike u analizi geoloških podataka*, Zagreb.
- Mandallaz, D., 1993: Geostatistical methods for double sampling scheme. *Chair of Forest Inventory and Planning*, ETH Zürich.
- Mandallaz, D., 2000: Estimation of the spatial covariance in Universal Kriging. *Environmental and Ecological Statistics* 7: 263–284.
- Matheron, G., 1965: *Les Variables Régionalisées et leur Estimation*, Paris.
- Montes, F., M. J. Hernandez, I. Canellas, 2005: A geostatistical approach to cork production sampling in *Quercus suber* forests. *Can. J. For. Res.* 35: 2787–2796.
- Nanos, N., G. Montero, 2002: Spatial prediction of diameter distribution models. *Forest Ecology and Management*, 161, 147–158.
- Nanos, N., R. Calama, G. Montero, L. Gil, 2004: Geostatistical prediction of height/diameter models. *Forest Ecology and Management*, 195: 221–235.
- Palmer, D. J., B. K. Höck, M. o. Kimberley, M. S. Watt, D. J. Lowe, T. W. Payn, 2009: Comparison of spatial prediction techniques for developing *Pinus radiata* productivity surfaces across New Zealand. *Forest Ecology and Management*, 258: 2046–2055.
- Pannatier, Y., 1996: *Variowin: Software for spatial data analysis in 2D*. New York.
- Payn, T. W., R. B. Hill, B. K. Höck, M. F. Skinner, A. J. Thorn., W. C. Rijkse, 1999: Potential for the use of GIS and spatial analysis techniques as tools for monitoring changes in forest productivity and nutrition, a New Zealand example. *Forest Ecology and Management*, 122, 187–196.
- Seidling, W., V. Mues, R. Fischer, 2000. Spatial variation of crown condition of main European tree species. *Work report of the Institute for World Forestry 2003/8*. Federal Research Centre for Forestry and Forest Products, Hamburg. Available online at: http://bfafh.de/bibl/pdf/i_03_08.-pdf (accessed 05.10.08).
- Stendahl, J. 2001: Spatial variability within managed forest stands. *Proceedings of the first international precision forestry cooperative symposium*. 35–42, Seattle.
- Tuominen, S., F. Stuart, S. Poso, 2003: Combining remote sensing, data from earlier inventories, and geostatistical interpolation in multisource forest inventory *Canadian Journal of Forest Research* 33: 624–634.
- Tröltzsch, K., J. Van Brusselen, A. Schuck, 2009: Spatial occurrence of major tree species groups in Europe derived from multiple data sources. *Forest Ecology and Management*, 257: 294–302.

Uttera, J., M. Maltamo, S. Kurki, S. Mykrä, 1998: Differences in forest structure and landscape patterns between ownership groups in Central Finland. *Boreal Env. Res.* 3: 191–200. ISSN 1239-6095.

Zawadzki, J., C. J. Cieszewski, M. Zasada, R. C. Lowe, 2005: Applying Geostatistics for In-

vestigations of Forest Ecosystems Using Remote Sensing Imagery. *Silva Fennica* 39(4): 599–617.

Osnova gospodarenja za g. j. “Banov Brod”.
Pravilnik o uređivanju šuma (NN 111/06; NN 141/08).

SUMMARY: The possibilities of forest measurements have been significantly improved nowadays, by using georeferenced maps, implementing remote sensing, developing artificial intelligence, using the global positioning system and geographical information system. Moreover, the exact position (x, y) of the measurement (of variables) of the specific location (Z) in the forest allows the monitoring of the information and the analysis of the so called continuous model of spatial variation, as opposed to the discrete model of spatial variation which is assumed to be homogeneous.

Ever since geostatistics was introduced to geosciences (Krige 1951, Mathe-ron 1965), it has been implemented in many areas whose interest lies in analyzing spatial data. Geostatistics is based on the concept of regionalized variable (which means that the value of the variable depends on the sampling area).

The goal was research and presentation of using geostatistics in the forest management, with the aim of improving the present approach to using and mapping the forest inventory data for Croatia. The geostatistical analysis was performed on a part of an management unit “Banov Brod”, Pitomača forestry administration, for three structural elements (variables): number of trees (N), basal area (G) and volume (V). The research included the compartments /sub-compartments 9a, d, e, 10 a, b (Figure 1), with the total area of 69, 57 ha.

In order to determine the anisotropy, semivariogram surface maps of each of the elements were made. The semivariograms were used as a measure of spatial dependence, and experimental and theoretical semivariograms were calculated. The experimental semivariogram for each structural element was calculated after multiple fitting of number and width of lags. The parameters used for Ordinary Kriging interpolation of each of the structural elements were obtained from the theoretical semivariogram model.

The interpolation of structural elements was also conducted by using the inverse distance method. The testing of the interpolation model was done by using a numeric cross-validation approach. Furthermore, the usefulness of making a variogram cloud in the spatial structural elements' analysis was shown. Three programs were used during this project: VARIOWIN 2.21; SURFER 8.0™, and STATISTICA 7.1™.

Semivariogram surface maps for the three analyzed structural elements did not indicate the presence of anisotropy (Figure 2). As anisotropy was not determined and omnidirectional experimental semivariogram were calculated (Figure 3). All experimental semivariograms can be considered reliable because they contain a great number of pairs of data. What they have in common is the existence of hardly explainable high nugget, that is the difference in the values of close samples or measurement errors, as well as the range, which is bigger than the sampling interval. The omnidirectional experimental semivariogram of the tree volume and basal area (Figures 3a, b) start oscillating very soon, which shows that there is no large range of these two structural elements in any direction. The omnidirectional experimental semivariogram of

the number of trees increases relatively quickly so this structural element shows the poorest spatial correlation (Figure 3c). The omnidirectional experimental semivariogram is approximated with the theoretical (Table 2, Figure 3). Sample distribution maps (Figures 4, 5 and 6) show an estimated value of structural elements on either coordinates (x, y) .

Structural elements' assessments through kriging and inverse distance method are tested with cross-validation and a root mean square error was used as an accuracy benchmark (Table 4). The mean square errors of assessment methods are very similar and therefore inconclusive when determining which interpolation method is more acceptable. Thus, a testing of the value differences between the measured data and interpolation methods for the three structural elements (number of trees, basal area and volume) was done by using the analysis of variance of repeated measurements. As visible in Table 5, statistically significant difference between the measurement data and interpolation methods of kriging and inverse distance was not determined.

During the assessment of structural elements' value (Figures 7, 8, 9) it is visible that the kriging assessment is more compatible with range of measurement values for all three structural elements, while inverse distance method measurements have a significantly lower value range (in other words model cells assessment tend to be around the mean value of incoming data). Consequently, this research considers kriging as the acceptable interpolation method when compared to inverse distance method.

The making of semivariogram cloud is a useful tool because it allows the observation of each variable (structural element) as a distance function (shown on the x -axis) between measured data (variogram values between pairs are shown on the y -axis) within the analyzed area (view of the forest are with locations where measurements were done) on an interactive interface.

In geostatistics the size of area and variable is not a limiting element. Any variable obtained through forest inventory, by tree type or total, can be observed by using a geostatistical analysis. The only condition is that some form of autocorrelation is assumed between them.

Since forest inventory is conducted periodically, the geostatistical method which allows the possibility of monitoring forests in space (spatial structure), also allows monitoring forests in time. The changes of variable(s) in space and time (change of structural elements' values by tree type and total, health of forests, etc.), as well as the forest management itself, can thus be monitored by continuously mapping two or more successive measurements. In addition, the above mentioned approach also enables the control of forest measurements.

By doing the forest inventory, a lot of information is gathered on the state of forests. Geomathematical tools (geostatistical and neural) enable the data to be used in a more relevant and rational way in space and time, in order to manage forests in a more optimal way.

Key words: forest management, forest inventory, structural elements, geostatistics, kriging, semivariogram.