

Ljiljana Šestan¹, Juro Čavlović²

RAZVOJ SIMULACIJSKOG MODELA REGULARNE ŠUME

THE DEVELOPMENT OF THE SIMULATION MODEL OF AN EVEN-AGED FOREST

SAŽETAK

Prirodne pojave, pa tako i pojave i procesi u šumi odvijaju se kontinuirano, a podaci o njima se prate uglavnom u određenim vremenskim razmacima, odnosno, bilježe se značajke procesa u određenim vremenskim trenucima. Zbog toga postoji raskorak između prirode ovih pojava i načina njihova mjerenja. Sustavska dinamika pripada tipu kontinuiranih simulacijskih modela, kod kojih se varijable stanja mijenjaju kontinuirano u vremenu. Upravo zbog toga metoda odgovara značajkama prirodnih procesa.

Prema koracima metodologije sustavske dinamike je obavljena analiza i snimka stanja u promatranom sustavu. Predmet istraživanja je regularna šuma, uređajni razred Bukva iz sjemena s ophodnjom 100 godina. Na temelju prikupljenih podataka izabran je objekt istraživanja. To su bukove sastojine u gospodarskoj jedinici Marča, koja se nalazi na području Uprave šuma podružnice Zagreb, šumarije Novoselec. Potrebni podaci su prikupljeni i obrađeni te je na temelju njih izgrađen verbalni, a zatim i konceptualni model - strukturni dijagram. Korištenjem programskog alata POWERSIM Studio 2003 obavljeno je prenošenje znanja o sustavu na računarski model i kao rezultat su nastali dijagram toka i matematičko-računarski model. Provedene su verifikacija i vrednovanje modela.

Ključne riječi: simulacija, modeliranje, sustavska dinamika, uređajni razred Bukva, matematičko-računarni model

UVOD

INTRODUCTION

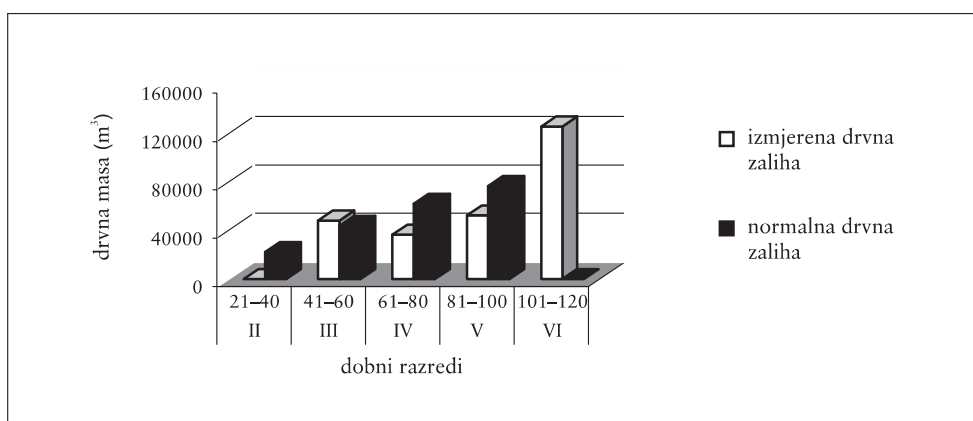
Svaki pokušaj odabira načina gospodarenja šumama mora uključivati dinamiku šuma (Rosser 2003). Znači, da bi se problemi gospodarenja šumskim ekosusta-

¹ „Hrvatske šume” d.o.o. – Uprava šuma podružnica Senj, Nikole Suzana 27, 53270 Senj, e-mail: ljiljana.loncar@zg.htnet.hr

² Šumarski fakultet, Svetošimunska 25, 10000 Zagreb

vima mogli ispravno sagledati, potrebno ih je promatrati u njihovoj dinamici. Primjena simulacija i metode sustavske dinamike omogućuje opisivanje i rješavanje složenih dinamičkih problema, kao što su problemi vezani za šumu i gospodarenje šumskim resursima. Tijekom posljednjih desetljeća, uslijed promjena u načinu upravljanja šumama, došlo je do promjena i u modeliranju razvoja šuma. Neki od najznačajnijih momenata su: usmjerenost pažnje na mješovite šume, ugradnja uzročno-posljedičnih veza u modele te promjena prioriteta u načinu upravljanja šumama, vezano za načelo održivog razvoja. Prednost primjene simulacija u modeliranju razvoja šuma (Čavlović 1996; Čavlović i Grladinović 2000) jest u tome što se eksperimentiranje ne provodi sa stvarnim sustavom, pa je na taj način moguće izbjeći pojavu neželjenih posljedica eksperimenta. Osim toga, omogućeno je da se u pojedine simulacijske modele ugrade i određene neželjene, ali moguće promjene kako bi se utvrdio njihov utjecaj na gospodarenje šumskim resursima na određenom području. Sustavska dinamika, kao i simulacijsko modeliranje općenito, omogućuje projektiranje simulacijskih modela gospodarenja određenim tipovima šuma, određenim vrstama drveća u šumi, istraživanje kretanja pojedinih parametara, i to na temelju konkretnog gospodarenja i konkretnih stanja pojedinih resursa (Porte i Bartelink 2002).

Složeni dinamički sustav regularne šume, sastavljen od dobnih razreda, promatra se kroz dobnu strukturu. Osnovni problem kod upravljanja ovim sustavima je narušena dobná struktura, koja onemogućava potpunu primjenu principa potrajnosti (Slika 1.).



Slika 1. Odnos izmjerene i normalne drvene zalihe 2002. godine uređajnog razreda Bukve iz sjemena
Figure 1 The ratio of measured and normal wood stock in the year 2002, management class Beech from seed

Prema godišnjem izvješću Europskog šumarskog instituta, potrebno je i dalje činiti velike napore kako bi se potrajno gospodarenje šumama i multifunkcionalna uloga šume “ugradili” u ekonomiju slobodnog tržišta (Flies 2003). U gospodare-

nju šumama velik je problem i s jedne strane, dugotrajnost prirodnih procesa, a s druge strane kratkoročnost planiranja (Lončar 2005).

Normalitet regularne šume prati se putem analize stanja i kretanja dobnih razreda. Razlikujemo površinski normalitet i normalni razmjer drvnih zaliha (volumena) po dobnim razredima. Kretanje dobnih razreda odvija se prirodnim putem, jer sastojine tijekom vremena stare i prelaze u više dobne razrede. Sastojine od I do V dobnog razreda promatrane bukove šume se samo prorjeđuju, s ciljem povećanja kvalitete. Na kraju ophodnje, to je VI dobni razred, stare sastojine se potpuno posijeku (oplodna sječa), da bi na njihovom mjestu iz sjemena najboljih stabala izrasla mlada sastojina (sastojina I dobnog razreda). Time je jedan životni ciklus šume zatvoren. Količine posječene putem redovnih prorjednih sječa, zbog nepravilne dobne strukture, značajno osciliraju po dobnim razredima. Interventne sječe (slučajni prihod), također mogu značajno djelovati na sustav, a predstavljaju kombinaciju djelovanja prirodnih procesa i gospodarskih zahvata, jer se izvode čim se primjeti sušenje, bolest ili oštećenost stabla, kako bi se bar donekle polučila gospodarska korist od oborenog stabla.

U slučaju regularnih šuma, glavni pokazatelj potrajnog gospodarenja je površinski normalitet. Normalitet po drvnjoj zalihi utvrđuje se za svaki pojedini uređajni razred u određenoj gospodarskoj jedinici. U ovom slučaju promatran je uređajni razred *Bukva iz sjemena* s ophodnjom od 100 godina. Za planiranje sječa važno je stanje drvnih zaliha po dobnim razredima, na koje uteče tečajni godišnji prirast, redovite sječe i interventne sječe, koje su slučajnog karaktera, te kretanje drvene zalihe između dobnih razreda. Prelazak drvene zalihe iz dobnog razreda u dobni razred nije jednoličnog karaktera, jer sastojine unutar dobnog razreda nisu jednolike starosne strukture. Znači da svake godine neće prijeći ista drvena zaliha, već brzina prijelaza oscilira. Zbog promjenjivog gospodarenja, kao i promjenjivog stanja u prirodi (sušenje stabala uslijed bolesti, vjetrolomi, vjetroizvale, itd.), sastojine također mogu promijeniti dobni razred. Ove utjecaje nije moguće ugraditi u model. Kretanje drvene zalihe u sustavu utjecano je i politikom izvođenja oplodnih sječa. Što je intenzitet oplodnih sječa veći, povećava se odljev drvene zalihe iz sustava, ali i površina koja pri tom prijede u prvi dobni razred, a samim tim i drvena zaliha koja će nakon 20 godina predstavljati priliv u sustav, odnosno drugi dobni razred. U slučaju izgradnje ovog modela regularne šume, količina priliva i politika izvođenja oplodnih sječa izračunate su uz pomoć pomoćnih varijabli na temelju drvene zalihe. Upravo način određivanja površina, gdje je ona u slučaju oplodnih sječa i priliva izvedena iz drvene zalihe, kao primarne varijable, glavno je ograničenje izgrađenog modela, koje je prilikom izgradnje novih modela potrebno otkloniti (temeljiti dobnu strukturu na površini).

Dakle, drvena zaliha sustava regularne šume osim pod utjecajem prirodnih procesa (tečajni godišnji prirast i starenje) mijenja se prema izgrađenom modelu i uslijed gospodarskih zahvata (prorede, oplodne sječe i interventne sječe). Obzirom da u sustavu šume dominiraju uzročno-posljedične veze, za razvoj sustavsko-dinamičkih modela primjenit će se metodologija sustavske dinamike.

MATERIJALI I METODE

MATERIAL AND METHODS

Da bi računalni model oponašao stvarni sustav, izgradnja simulacijskog modela započinje analizom stanja u promatranom sustavu, odnosno izabranom objektu istraživanja. Istraživanje je provedeno na području Uprave šuma Podružnice Zagreb, šumarije Novoselec, u gospodarskoj jedinici Marča. Stanje u promatranom sustavu uređajnog razreda Bukve iz sjemena s ophodnjom 100 godina, utvrđeno je u Odjelu za uređivanje šuma Uprave šuma podružnice Zagreb, iz Osnova gospodarenja i evidencija o izvršenim sječama. Dio podataka je dobiven izmjerom prilikom izrade redovite revizije Osnove gospodarenja u razdoblju od 15. lipnja 2001. do 15. studenog 2001. godine. Izdvojeni podaci za razdoblje od 1982-2002. godine klasificirani su po dobnim razredima. Stanje dobne strukture utvrđeno je prikupljanjem i obradom podataka o drvnjoj zalihi, površini i postotku prirasta dobnih razreda. Za svaki dobnii razred prikupljeni su podaci o izvršenim redovitim i interventnim sječama (slučajni prihod). Podaci o godišnjoj učestalosti interventnih sječa statistički su obrađeni uz pomoć alata Stat:Fit iz simulacijskog paketa Service Model v4.2.

Prikupljeni i obrađeni podaci omogućili su izradu konceptualnog simulacijskog modela dinamičkog sustava šume.

REZULTATI

RESULTS

Rezultat obrade podataka dobivenih snimkom i analizom stanja promatranog sustava je dobnii struktura po drvnjoj zalihi prikazana u Tablici 1.

Tablica 1. Dobnii struktura promatranog sustava po drvnjoj zalihi
Table 1 Age structure of the system by wood stock

Dobnii razredi - DRVNA ZALIHA (m ³)							
godina	I	II	III	IV	V	VI	ukupno
1982.	-	15895	11146	67359	258854	0	353254
1992.	-	12279	25441	49548	158339	65068	310675
2002.	-	0	48484	36688	52709	126197	264078

Prikaz dobne strukture promatranog sustava po površini nalazi se u Tablici 2.

Tablica 2. Dobnii struktura promatranog sustava regularne šume po površini
Table 2 Age structure of the system of a regular forest by area

Dobnii razredi - POVRŠINA (ha)							
godina	I	II	III	IV	V	VI	ukupno
1982.	0	137,27	68,4	200,28	646,89	0	1052,84
1992.	0	89,1	125,82	181,81	358,22	160,85	915,8
2002.	20,46	0	197,34	123,17	145,35	439,56	925,88

Na temelju stanja drvnih zaliha po dobnim razredima (Tablica 1.) i stanja površina (Tablica 2.) utvrđena je drvena zaliha po jedinici površine (ha) po dobnim razredima, prikazana u Tablici 3.

Tablica 3. Stanje drvnih zaliha po jedinici površine po dobnim razredima regularne šume
Table 3 Wood stock per hectare and age classes of a regular forest

Dobni razredi - DRVNA ZALIHA PO JEDINICI POVRŠINE (m ³ /ha)						
godina	I	II	III	IV	V	VI
1982.	-	116	163	336	400	0
1992.	-	138	202	272	442	405
2002.	-	0	246	298	363	287

U Tablici 4. prikazane su izmjerene vrijednosti postotka prirasta po dobnim razredima, kao i utvrđena srednja vrijednost postotka prirasta za šumu Marča.

Tablica 4. Postotak prirasta po dobnim razredima regularne šume
Table 4 Increment percentage by age classes of a regular forest

Dobni razredi - POSTOTAK PRIRASTA (%)						
godina	I	II	III	IV	V	VI
1982.	-	8	5	4	2	0
1992.	-	4	4	3	2	2
2002.	-	0	4	4	3	2
Srednja vrijednost	-	6	4	4	2	2

Na temelju evidencija o izvršenim godišnjim redovitim prorjednim sječama, u Tablici 5. prikazane su vrijednosti redovitih sječa po dobnim razredima.

Tablica 5. Godišnje vrijednosti redovitih sječa u regularnoj šumi
Table 5 Annual values of prescribed cuts in a regular forest

Dobni razredi - REDOVITE SJEČE (m ³)				
godina	II	III	IV	V
1982	0	519	0	0
1983	0	0	0	3153
1984	0	0	0	2841
1985	0	0	0	1173
1986	0	0	0	3906
1987	1045	851	831	3722
1988	1172	47	3102	643
1989	0	23	0	2436
1990	0	652	1487	3050
1991	336	0	0	765
1992	0	0	1221	3442
1993	0	0	0	7261
1994	0	537	0	1540
1995	0	0	291	5263
1996	740	1885	2380	4675
1997	0	0	3987	9022
1998	0	0	0	4205
1999	0	0	0	2857
2000	0	0	781	5999
2001	885	0	0	0
UKUPNO	4178	4514	14080	65953
Prosječno godišnje:	208,9	225,7	704	3297,65

U Tablici 6. prikazane su vrijednosti interventnih sječa kao prosječne količine u m³ koje se posijeku jednom sječom za razdoblje od 1982. do uključujući 2001.godinu. Godišnja učestalost interventnih sječa utvrđena je određivanjem karakterističnih distribucija, čiji su parametri dani u Tablici 7.

Tablica 6. Prosječne količine interventnih sječa u regularnoj šumi
Table 6 Average wood mass of intervention cuts in a regular forest

Dobni razredi - INTERVENTNE SJEČE (m ³)								
UKUPNO	II		III		IV		V	
	broj sječa	količina	broj sječa	količina	broj sječa	količina	broj sječa	količina
	19	417	18	304	1784	135	17731	
m ³ /sječa	21,95	16,89	39,64	131,34				

Tablica 7. Odabrane distribucije za učestalost interventnih sječa
Table 7 Selected distributions for frequency of intervention cuts

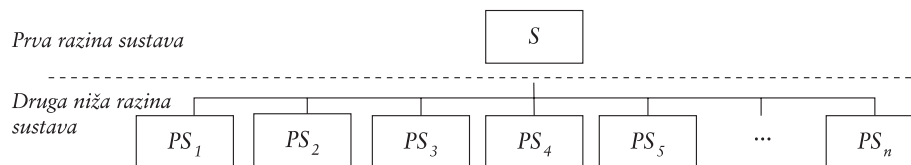
DOBNI RAZRED	DISTRIBUCIJA	VJEROJATNOST POUZDANOSTI	KOLMOGOROV-SMIRNOV TEST	
			K-S	H ₀ /H ₁
II	UNIFORM (0., 6.)	0,95	0,2	H ₀
III	UNIFORM (0., 12.)	0,95	0,183	H ₀
IV	EXPONEN. (0., 4.4)	0,95	0,215	H ₀
V	UNIFORM (0., 16.)	0,95	0,225	H ₀

Podaci o godišnjoj učestalosti interventnih sječa su slučajnog karaktera (slučajni prihod). Kako bi se što vjernije prenijela zakonitost ponašanja ovog parametra na računalski model, uz pomoć alata Stat::Fit iz simulacijskog paketa Service Model v4.2., obavljeno je određivanje karakterističnih distribucija po dobnim razredima. Postupak je jednak za sve dobne razrede. Razina signifikantnosti je 5 %. Broj stupnjeva slobode određuje se prema broju razreda distribucije frekvencija i rangu krivulje. Test uz pomoć kojeg će se utvrditi dobrota slaganja parametra s teorijskom distribucijom je Kolmogorov-Smirnov test (K-S test). Temeljni statistički pokazatelji kretanja promatranih vrijednosti dati su u Tablici 7.

Analiza stanja izabranog objekta istraživanja podloga je za izradu verbalnog i strukturnog modela.

Verbalni i strukturni model promatranog sustava

Prva faza metodološkog pristupa sustavske dinamike jest razvoj verbalnog modela, koji nam omogućuje prepoznavanje i definiranje sustava i njegovih granica, unutar kojih ćemo ga promatrati. Dinamički sustav regularne šume, točnije uređajnog razreda Bukve iz sjemena, promatramo kroz njegovu dobnu strukturu sastavljenu od dobnih razreda, koju možemo prikazati grafički, hijerarhijskim dijagramom (Slika 2.).

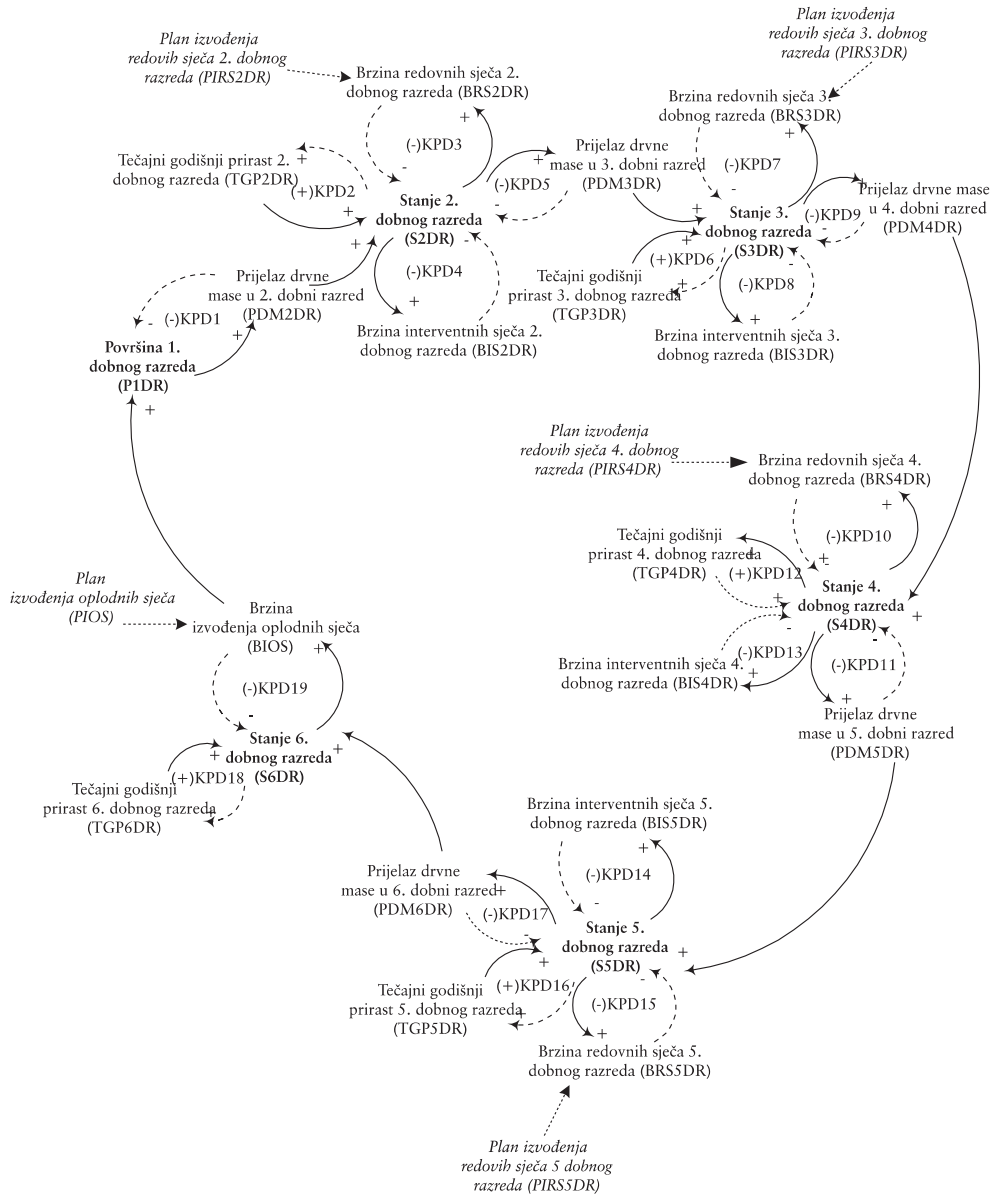


S – uređajni razred, PS₁...PS_n – dobni razredi

Slika 2. Hijerarhijski dijagram dinamičkog sustava regularne šume
Figure 2 Hierarchy diagram of the dynamic system of a regular forest

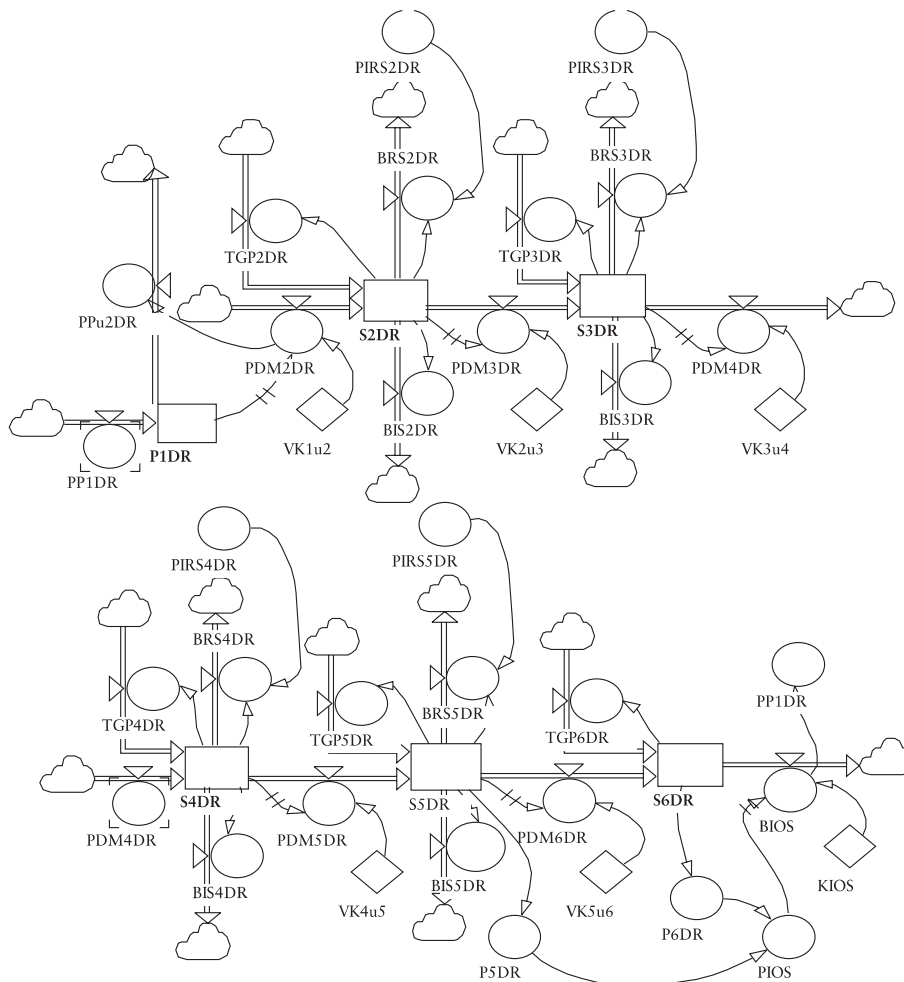
Većina realnih sustava je kompleksne prirode, te ih je potrebno rasčlaniti na podsustave (Seila i dr. 2003). Sustav uređajnog razreda je rasčlanjen do druge niže razine, podsustava dobnih razreda. Broj podsustava ovisi o duljini trajanja ophodnje i širini dobnog razreda. Osnovni nedostatak hijerarhijskog dijagrama je što pomoću njega ne možemo uočiti strukturu sustava (Radošević 2001). Prema metodologiji sustavske dinamike struktura promatranog dinamičkog sustava prikazat će se strukturnim dijagramom na temelju verbalnog modela.

Verbalni model dinamičkog sustava regularne šume objasniti će se definiranjem osnovnih strukturnih elemenata sustava, tj. komponenti jednadžbi promjene stanja i krugova povratnog djelovanja (KPD), pomoću kojih je moguće odrediti zatvorene sustave, koji ovisno o predznaku imaju (+) akumulacijski ili (-) regulacijski karakter. Pri izradi strukturnog dijagrama elemente sustava tretiramo kao varijable čije vrijednosti mogu stalno rasti (akumulacijski karakter) ili je taj rast ograničen (regulacijski karakter) (Kirkwood 1998). Veća površina prvog dobnog razreda (P1DR) osigurava veći prijelaz drvene zalihe (PDM2DR) u drugi dobnog razred, što dovodi do povećanja stanja tog dobnog razreda (S2DR) i označava pozitivnu uzročno-posljedičnu vezu. Veza između varijable P1DR s mjernom jedinicom ha/god. i varijable PDM2DR s mjernom jedinicom m³/god., omogućena je uvođenjem koeficijenta pretvorbe u definiciju varijable PDM2DR. Veća vrijednost varijable PDM2DR uzrokuje smanjenje P1DR, znači negativnu uzročno-posljedičnu vezu. Povratna veza između varijable PDM2DR i P1DR, omogućena je uvođenjem pomoćne varijable PP2DR, koja pretvara m³/god. u ha/god. Time je zatvoren regulacijski krug povratnog djelovanja (-KPD1). Krugovi povratnog djelovanja (-)KPD5, (-)KPD9, (-)KPD13, (-)KPD17 i (-)KPD21, su također regulacijskog karaktera, a prikazuju uzročno-posljedične veze između stanja dobnog razreda i brzina prijelaza PDM3DR, PDM4DR, PDM5DR, PDM6DR i PDM7DR. Tečajni godišnji prirast (TGP2DR) dovodi do povećanja S2DR, a veće S2DR povećava TGP2DR, što rezultira akumulacijskim (+)KPD2. Obzirom da tečajni godišnji prirast u slučaju svih dobnih razreda, ima pozitivnu uzročno-posljedičnu vezu prema stanju dobnog razreda, a stanje dobnog razreda pozitivnu povratnu vezu, rezultat su akumulacijski (+)KPD6, (+)KPD12, (+)KPD16, (+)KPD20 i (+)KPD22. Izvođenje redovitih sječa smanjuje S2DR, što znači da je uzročno-posljedična veza negativna. Obzirom da se ne može planirati niti izvoditi sječa ukoliko je S2DR jednako nuli, odnosno ukoliko je drvna zaliha u dobnom razredu jednaka nuli, postoji pozitivna, logička uzročno-posljedična veza BRS2DR (brzina re-



Slika 3. Strukturni dijagram
 Figure 3 Structural diagram

dovnih sječa drugog dobnog razreda) prema S2DR. Time je nastao (-)KPD4, regulacijskog karaktera. Isto uzročno-posljedično djelovanje je prisutno i u slučaju BRS3DR, BRS4DR, BRS5DR i BRS6DR, što je rezultiralo regulacijskim: (-)KPD8, (-)KPD11, (-)KPD15 i (-)KPD19. Interventne sječe, kao i redovite, smanjuju stanja



Slika 4. Dijagram toka modela: S2DR,S3DR,...,S6DR - stanje dobnog razreda, P1DR, P5DR, P6DR– površina n-tog dobnog razreda, PP1DR i PP2DR - prijelaz površine u prvi, odnosno drugi dobnii razred, PDM2DR, PDM3DR,..., PDM6DR - prijelaz drvene mase u n-ti dobnii razred, BRS2DR, BRS3DR,..., BRS5DR - brzina redovitih sječa u n-tom dobnom razredu, BIOS - brzina izvođenja oplodnih sječa, PIOS - Plan izvođenja oplodnih sječa, PIRS2DR, PIRS3DR,..., PIRS5DR - plan izvođenja redovitih sječa u n-tom dobnom razredu, BIS2DR, BIS3DR,..., BIS5DR - brzina interventnih sječa u n-tom dobnom razredu, TGP2DR, TGP3DR,..., TGP6DR - tečajni godišnji prirast n-tog dobnog razreda, VK1u2, VK2u3,..., VK5u6- vrijeme kašnjenja prijelaza iz jednog u drugi dobnii razred, KIOS - kašnjenje izvođenja oplodnih sječa.

Figure 4 Model flowchart: S2DR,S3DR,...,S6DR – age class status, P1DR, P5DR, P6DR– n^{th} age class area, PP1DR, PP2DR – area transgression to first or second age class, PDM2DR, PDM3DR,..., PDM6DR – wood mass transgression to the n^{th} age class, BRS2DR, BRS3DR,..., BRS5DR – the velocity of regular cuts in the n^{th} age class, BIOS - the velocity of shelterwood cuts, PIOS – the plan of shelterwood cuts, PIRS2DR, PIRS3DR,..., PIRS5DR - the plan of regular cuts in the n^{th} age class, BIS2DR, BIS3DR,..., BIS5DR – the velocity of intervention cuts in the n^{th} age class, TGP2DR, TGP3DR,..., TGP6DR – annual increment of the n^{th} age class, VK1u2, VK2u3,..., VK5u6- delay time for transgression from one to the next age class, KIOS – the delay in shelterwood cuts.

dobnih razreda, dakle prisutna je negativna uzročno-posljedična veza. Da bi se interventna sječa dogodila, stanje dobnog razreda treba biti pozitivno, što označava pozitivnu uzročno-posljedičnu vezu. Time su nastali regulacijski krugovi povratnog djelovanja: (-)KPD3, (-)KPD7, (-)KPD10, (-)KPD14 i (-)KPD18. Veća brzina izvođenja oplodnih sječa (BIOS) negativno utječe na S7DR, znači prisutna je negativna uzročno-posljedična veza. S7DR povratno pozitivno utječe na BIOS, kao rezultat nastaje regulacijski (-)KPD23. BIOS povećava površinu prvog dobnog razreda (P1DR), što označava pozitivnu uzročno-posljedičnu vezu. Da bi se ta veza BIOS - P1DR mogla ostvariti, potrebno je uvesti pomoćnu varijablu, koja će pretvarati $m^3/god.$ u $ha/god.$ Ta varijabla je PP1DR. BIOS ovisi o vanjskoj varijabli, planu izvođenja oplodnih sječa (PIOS). Brzine redovitih sječa BRS2DR, BRS3DR, BRS4DR, BRS5DR i BRS6DR su pod utjecajem vanjskih varijabli, planova izvođenja redovitih sječa PIRS2DR, PIRS3DR, PIRS4DR, PIRS5DR i PIRS6DR.

Ovim verbalnim modelom je opisan promatrani sustav regularne šume, a na temelju njega se pristupilo sljedećoj fazi, izgradnji strukturnog modela. Na Slici 3., pomoću strukturnog dijagrama prikazana je struktura sustava regularne šume.

Može se zaključiti da su u promatranom sustavu prisutni sljedeći regulacijski tokovi: brzina prijelaza sastojina iz jednog u drugi dobní razred, te tokovi koji se odnose na vrste sječa: redovne, interventne i oplodne sječe. Akumulacijski tokovi povezuju tečajni godišnji prirast dobnog razreda i stanje dobnog razreda.

Simulacijski model dinamičkog sustava regularne šume

Znanje o promatranom sustavu preneseno je na računarski model, uz pomoć programskog simulacijskog paketa POWERSIM Studio 2003, objektno orijentiranog programa u kojem se programski kod generira izradom dijagrama toka (Slika 4.), tako da izgradnja dijagrama toka teče paralelno s izgradnjom matematičko-računarskog modela. POWERSIM omogućuje formalizaciju koncepata sustavske dinamike u obliku matematičko-računarskog simulacijskog modela.

Matematičko-računarski model regularne šume

Dinamiku promatranog sustava regularne šume moguće je opisati sustavom diferencijalnih jednadžbi:

$$\frac{d(S2DR - 15895m^3)}{dt} = PDM2DR + TGP2DR - BRS2DR - BIS2DR - PDM3DR \quad (1)$$

$$\frac{d(S3DR - 11146m^3)}{dt} = PDM3DR + TGP3DR - BRS3DR - BIS3DR - PDM4DR \quad (2)$$

$$\frac{d(S4DR - 67359m^3)}{dt} = PDM4DR + TGP4DR - BRS4DR - BIS4DR - PDM5DR \quad (3)$$

$$\frac{d(S5DR - 258854m^3)}{dt} = PDM5DR + TGP5DR - BRS5DR - BIS5DR - PDM6DR \quad (4)$$

$$\frac{d(S6DR - 0m^3)}{dt} = PDM6DR + TGP6DR - BIOS \quad (5)$$

$$\frac{d(P1DR - 0ha)}{dt} = PP1DR - PP2DR \quad (6)$$

U jednadžbama (1), (2), (3), (4), (5) i (6) korištene su konstante, koje predstavljaju početna stanja drvnih zaliha promatranih dobnih razreda 1982 godine. Podaci su dobiveni mjerenjem i nalaze se u tablici 1. U jednadžbi (6), početno stanje prvog dobnog razreda izraženo je površinom, utvrđenom također mjerenjem 1982. god. Podatak se nalazi u tablici 2. Integracija navedenih jednadžbi, rezultira matematičko-računarskim modelom kojim je opisana dinamika promatranog sustava. Jednadžbom (7) definirano je normalno stanje sustava, utvrđeno na temelju normaliteta.

$$\begin{aligned} aux \quad NS = STOPRUNIF((S2DR = 22000)AND(S3DR = S2DR * 2) \\ AND(S4DR = S3DR * 1,4)AND(S5DR = S4DR * 1,2)) \end{aligned} \quad (7)$$

Jednadžba (7) omogućuje zaustavljanje simulacije u trenutku kada sustav postigne stanje ravnoteže, odnosno stanje normaliteta.

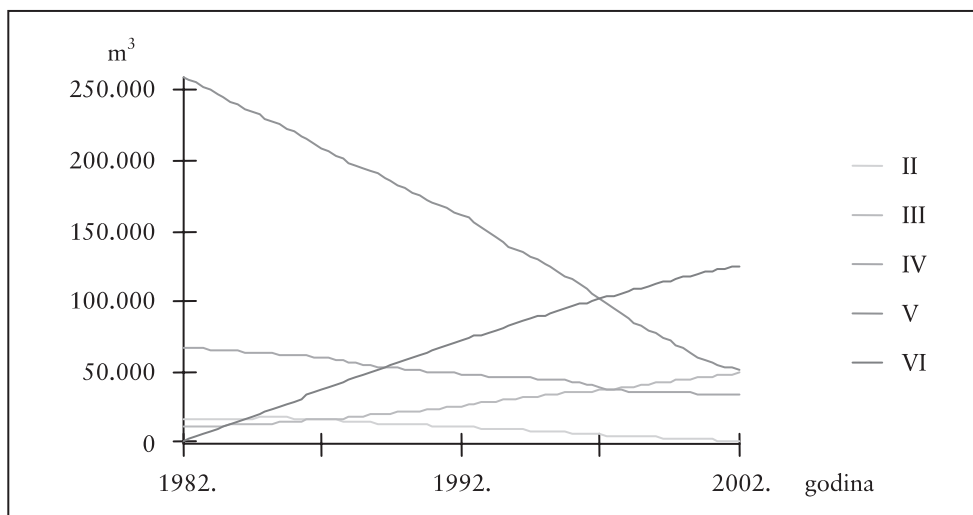
Verifikacija računarskog modela

Postupkom verifikacije utvrđuje se usklađenost konceptualnog i računarskog modela. Računarski model nastao na temelju konceptualnog modela, treba sadržavati sve bitne osobine konceptualnog modela, a to su odgovarajući parametri i logika funkcioniranja (Munitić 1989). Obzirom da metodologija sustavske dinamike uključuje izgradnju dva konceptualna modela, dijagrama uzročnih petlji ili strukturnog dijagrama i izgradnju dijagrama toka, dobro proveden postupak verifikacije je tim važniji. Primjena programskog paketa POWERSIM, olakšava prijelaz sa strukturnog na računarski model, jer se programski kod generira paralelno s izgradnjom dijagrama toka. Znači da se već prilikom izgradnje računarskog modela vrši verifikacija kroz usklađivanje strukturnog dijagrama, dijagrama toka i matematičko-računarskog modela. Dinamika promatranog sustava opisana je sustavom diferencijalnih jednadžbi (1), (2), (3), (4), (5) i (6). U model su unesene definicije varijabli prema matematičko-računarskom modelu i vrijednosti varijabli utvrđene obradom podataka. Verifikacija je provedena i izvođenjem eksperimenata s različitim sjemenom za korištenje slučajnih brojeva, kao i ponavljanjem eksperimenata s istim sjemenom.

Provođenjem postupka verifikacije računarskog modela utvrđeno je da model dobro oponaša stvarni sustav, te da je na temelju njegovog ponašanja moguće zaključivati o stvarnom sustavu.

Validacija računarskog modela

Replikativno vrednovanje simulacijskog modela je provedeno primjenom izgrađenog računarskog modela i prikupljenih i obrađenih podataka izabranog objekta



Slika 5. Simulirana dinamika dobnih razreda
Figure 5 Simulated dynamics of age classes

Tablica 8. Simulirana dinamika dobnih razreda
Table 8 Simulated dynamics of age classes

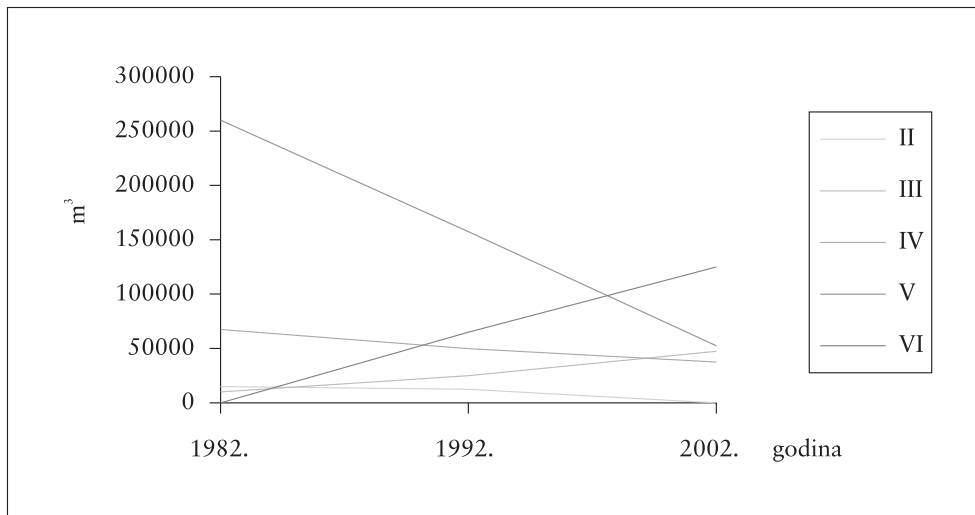
Time	2DR	3DR	4DR	5DR	6DR	SUMA
1982.	15.895,00	11.146,00	67.359,00	258.854,00	0,00	352.254,00
1992.	10.719,01	25.843,60	48.510,05	161.490,40	71.695,76	318.258,82
2002.	-43,85	49.061,01	34.171,94	34.171,94	125.603,37	259.801,49

istraživanja. Provedena je simulacija za vremensko razdoblje do 1982. do 2002. godine. Rezultati simulacije prikazani su dijagramom na Slici 4. i u Tablici 8.

U Tablici 1. navedeni su podaci koji karakteriziraju stvarnu dinamiku dobnih razreda. Dijagramom na Slici 6. prikazana je dinamika stanja dobnih razreda utvrđena mjerenjem 1982., 1992. i 2002. godine.

Na temelju usporedbe simuliranog kretanja dobnih razreda (Slika 5.) i stvarnog kretanja dobnih razreda (Slika 6.) možemo ocijeniti valjanost simulacijskog modela. Vremenski korak u modelu je 0,25 god., dok su mjerenja vršena u razmaku od po 10 godina, pa je stoga na Slici 5. kod simuliranog kretanja dobnih razreda prisutan „finiji” prijelaz drvnih zaliha. Općenito se može reći da su tendencije kretanja dobnih razreda slične. Prisutne manje razlike uzrokovane su vjerojatno promjena u načinu gospodarenja, što nije bilo moguće ugraditi u model. Usporedbom rezultata i međurezultata dobivenih simulacijom i prikazanim u Tablici 8. i stvarnih podataka, prikazanih u Tablici 1., utvrđeno je odstupanje u okvirima očekivanog.

Vrednovanje modela predstavlja stupanj zadovoljavanja (Čerić 1993). Stoga simulacijski model treba zadovoljiti prihvatljivu razinu pouzdanosti, kako bi se zaključci na temelju ponašanja modela mogli tretirati kao ispravni i primjenjivi na



Slika 6. Stvarna dinamika dobnih razreda
Figure 6 Actual dynamics of age classes

stvarni sustav. S tim u skladu možemo zaključiti da model dobro oponaša stvarni sustav i da se na temelju njegovog ponašanja mogu donositi zaključci o ponašanju stvarnog promatranog sustava regularne šume.

RASPRAVA I ZAKLJUČCI

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Temeljem prikazane primjene metodologije sustavske dinamike u izgradnji modela dinamičkog sustava regularne šume, uređajnog razreda Bukva iz sjemena mogu se iznijeti sljedeći zaključci:

1. Promatrani sustav regularne šume ukazuje na neravnotežu sustava, što je predloženo dijagramom na Slici 1.
2. Simulacijom uz pomoć sustavske dinamike utvrđuje se utjecaj upravljanja na sustav i njegove performance, kao i posljedice dugoročnih politika na rad sustava. Upravo zbog toga su podaci, prikupljeni na standardni način, analizirani i sustavno prikazani na način koji ova metoda zahtjeva.
3. Postojeći način evidentiranja sječa ne vodi računa o dinamici sječa po dobnim razredima, što otežava prikupljanje i praćenje podataka o sječama po dobnim razredima. Problem je i promjenjivo gospodarenje u prošlosti, što je onemogućilo prikupljanje relevantnih podataka za duže razdoblje od 20 godina.
4. Prema rezultatima provedenih istraživanja proizlaze sljedeći koraci metodologije koju treba primjeniti u budućim istraživanjima:
 - Klasificirati šume, prema važećim kriterijima šumarske prakse i znanosti
 - Statistički obraditi uzorke

- Izgraditi simulacijske modele
 - Provesti verifikaciju i validaciju modela u praksi.
 - Prema navedenim koracima moguće je izgraditi modele pojedinih tipova šuma za cijelu Hrvatsku. U tom slučaju treba odabrati reprezentativne uzorke i provjeriti njihovu podudarnost.
 - Ograničenje modela koje se odnosi na izvođenje priliva i oplodne sječe, gdje se površina dobnih razreda izvodi iz drvne zalihe, potrebno je prilikom izgradnje novih modela otkloniti, odnosno projekcije dobne strukture temeljiti na površini.
5. Modeli izgrađeni prema navedenim koracima metodologije sustavske dinamike mogu se unaprijediti uvođenjem dodatnih elemenata. Pri tom ih je potrebno učiniti senzibilnijim na utjecaj okoline i tijekom vremena ih osvježavati s novim podacima, kako bi prognoza bila temeljena na svježim podacima, a model sposoban projicirati intervencije čovjeka i prirodne promjene izvan planiranih mjera.
 6. Potrajno gospodarenje moguće je realizirati samo uz pomoć dugoročnog planiranja, koje dosadašnje metode ne podržavaju. Nesrazmjer između životnog vijeka šume i načina planiranja moguće je prevladati uvođenjem novih metoda planiranja. Metode, kao što je sustavska dinamika, uvelike bi pridonijele kvaliteti planova gospodarenja šumama, a sve s ciljem ostvarivanja potrajnog gospodarenja šumom.

LITERATURA

REFERENCES

- Čavlović, J. 1996. Sustavna dinamika u planiranju gospodarenja regularnim šumama na području Uprave šuma Zagreb. Glas. šum. pokuse 33: 109-152.
- Čavlović, J., Grladinović, T. 2000. Primjena sustava dinamičkog modeliranja pri gospodarenju šumama, Modeliranje u znanosti, tehnici i društvu, četvrti dio – kreativno rješavanje zadataka. U: Zbornik radova Akademije tehničkih znanosti, Hrvatsko društvo za sustave, Rijeka. 287-294.
- Čerić, V. 1993. Simulacijsko modeliranje. Zagreb: Školska knjiga.
- Flies, R. 2003. Forestry Strategy for Europe. 10th Annual Conference of the European Forestry Institute: Forest research crossing borders, Finland.
- Kirkwood, C.W. 1998. System Dynamics Methods, College of Business Arizona State University USA.
- Lončar, L. 2005. Sustavska dinamika u analizi gospodarenja šumom. Magistarski rad. Varaždin: Fakultet organizacije i informatike Sveučilišta u Zagrebu.
- Muntić, A. 1989. Kompjuterska simulacija. Split: Brodosplit Kultura.
- Porte, A., Bartelink, H.H. 2002. Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. Ecol. Model. 150(1-2): 141-188.
- Radošević, D. 2001. Osnove teorije sustava. Zagreb: Nakladni zavod Matice Hrvatske.
- Rosser, J., Barkley, JR. 2003. Complexities of dynamic forestry management policies. James Madison University, USA.
- Seila, A.F., Čerić, V., Tadikamalla, P. 2003. Applied Simulation Modeling. Thomson Books/Cole, USA.

THE DEVELOPMENT OF THE SIMULATION MODEL OF AN EVEN-AGED FOREST

Summary

System Dynamics is a methodology for research, modelling, simulation and optimisation of the complex dynamical systems, whose first phase of development was characterized by its author Prof. Jay Forrester. Further development of System Dynamics expands its application to different systems, such as different types of forests. The subject of this work is to present the methodology which enables the creation of the dynamic system of an even-aged forest, based on the system analysis and system dynamics. The research was carried out in the area of Zagreb Forest district, Novoselec Forest office, Management unit «Marča». The required data are provided on the basis of the forest inventory data, collected in 2001 during the elaboration of the management plan for management unit «Marča». Gathered and processed data have made it possible to build the verbal and conceptual – structural simulation model of the forest dynamic system, together with application of the system dynamics method in the analysis of the forest management. The transfer of knowledge about the system is made with the use of computer software POWERSIM Studio 2003. The verification and the validation of the model were conducted. The disproportion between the timeline of the existing management planning and the forest growth could be overcome with the use of the simulations, that is, System Dynamics method. The completed models would ensure long-term planning and could be used as a supplement to the existing methods, all for the benefit of improving the control and quality of system management. Finally, such a method of management planning would enable the realization of the sustainable forestry and the principles of sustainable development. According to the opinion of the author, system of an even-aged forest belongs to nonlinear and complex area in which modelling with System Dynamics will give better results than the application of “classic” methods of prediction.

Keywords: simulation, modelling, system dynamics, Beech management class, mathematical computer model.

