NONLINEAR DYNAMIC MODEL OF SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT

NELINEARNI DINAMIČKI MODEL ODRŽIVOG GOSPODARENJA ŠUMAMA

BEZAK, Karlo

Abstract: *A forest is a chaotic non-linear dynamic system. A dynamic system denotes a rule which describes a change of condition in space in dependence of time. The rules of forest growth are complex equations of growth and development of a stand's diameter and height structure. The solutions are complex numbers, and their mapped forms are dendrograms in which vertical directions show amplitudes or multidimensional vectors, while horizontal directions show space and time. Complex numbers are sets which show possible physical conditions and form complex vector space of growth and increment. Complex equations of growth are qualitative tools for quantitative, numerical multidimensional modelling of forest growth and development.*

Key words: *nonlinear dynamics, complex vector space, sustainable forest management*

Sažetak: *Šuma je kaotični nelinearni dinamički sustav. Dinamički sustav je pravilo koje opisuje promjenu stanja u nekom prostoru u ovisnosti o vremenu. Pravila rasta šuma su kompleksne jednadžbe rasta i razvoja sastojinske debljinske i visinske strukture. Rješenja su kompleksni brojevi, a njihova preslika dendrogrami u kojima okomiti smjerovi prikazuju amplitude ili multidimenzionalne vektore, a vodoravni smjerovi prostor i vrijeme. Kompleksni brojevi su skupovi koji predstavljaju moguća fizička stanja i tvore kompleksni vektorski prostor rasta i prirasta. Kompleksne jednadžbe rastenja kvalitativni su alati za kvantitativno, numeričko multidimenzijsko modeliranje rasta i razvoja šuma.*

Ključne riječi: *nelinearna dinamika, kompleksni vektorski prostor, održivo gospodarenje šumama*

Authors´ data: Karlo, **Bezak**, dr. sci., viši znanstveni suradnik u mirovini, karlo.bezak@gmail.com

1. Uvod

Šuma je kaotični nelinearni dinamički sustav. Dinamički sustav je pravilo koje opisuje promjenu stanja u nekom prostoru u ovisnosti o vremenu. Prostor može biti običan koordinatni sustav, ali isto tako može biti kompleksna konfiguracija promatranog ekosustava u kojem se šuma nalazi. Dinamika je pravilo kako od sadašnjeg stanja doći na sljedeće. Pravilo koje opisuje promjenu stanja sustava kroz vrijeme je determinističko. Pravilo su kompleksne jednadžbe rasta i razvoja šuma. Sustavi koji imaju takve jednadžbe koje nisu rješive eksplicitno, nazivaju se nelinearni dinamički sustavi. U šumama, period je vrijeme koje mora proći kada krošnja ponovo prolista. Period kada stablo formira god jest jedna godina. Rast koji se iz godinu na godinu ponavlja, periodično je gibanje. Takvo gibanje može se preslikati točkama u faznom prostoru. Točke opisuju krivulje koje imaju zatvorenu petlju. Drugim riječima periodičnost nam daje mogućnost nadzora nad stabilnošću šume i numeričku prognozu rasta i razvoja. Pravilnikom za uređivanje šuma [1] propisuje se linearni model planiranja. Preslerovim svrdlom buše se stabla kako bi linearno prognozirali budući debljinski prirast. Mjere se visine stabala kako bi se konstruirale visinske krivulje, a na temelju istih konstruirale jednoulazne volumne tablice. Izmjereni izvrtci debljinskog prirasta i izmjerene visine razvrstane su u dobne razrede raspona starosti 20 godina. Takvo grubo razvrstavanje izmjerenih podataka iskrivljuje položaj i nagib debljinskog prirasta, ali i položaj i nagib visinskih krivulja. Takvo razvrstavanje i linearna prognoza budućeg razvoja debljinskog prirasta i visinskog rasta daje potpuno pogrešnu prognozu budućeg rasta i razvoja šume. Cilj je istraživanja izraditi model održivog gospodarenja koji se oslanja na sveobuhvatnu zakonitost rasta i razvoja šuma.

2. Kompleksni vektorski prostor rasta i razvoja šuma

Sveobuhvatna je paradigma kako staze modeliranja prirode vode kroz diferencijalne jednadžbe. Model rasta i razvoja šuma su jednadžbe prigušenih i prisilnih gibanja [2]. Jednadžbe sam modificirao i postavio kompleksne jednadžbe rasta i razvoja:

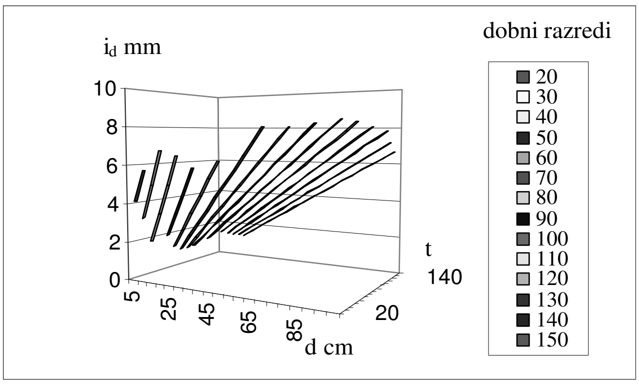
debljinske strukture $\Psi_{d,D} = A_{d,D}\, e^{-k\,t} \sin(\omega_{d,D}\, t - \varphi)$ (1)

visinske strukture $\Psi_{h,ld,lk} = A_{h,ld,lk}\, e^{-k\,t} \sin(\omega_{h,ld,lk}\, t - \varphi) - A_{h,ld,lk} \sin(g\, t)$ (2)

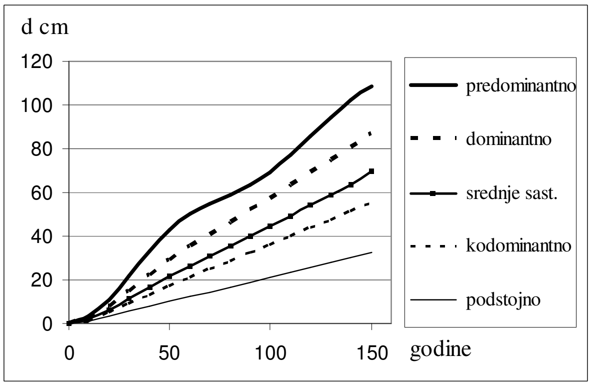
Simboli u jednadžbama su: $\Psi_{d,D}$ – kompleksni brojevi debljinske strukture; $\Psi_{h,ld,lk}$ – kompleksni brojevi visinske strukture; $A_{d,D}$ – valne amplitude debljinske strukture, $A_{h,ld,lk}$ – valne amplitude visinske strukture, e – baza prirodnog logaritma; k – koeficijent otpora rastu; t – vrijeme; ω_d – koeficijent pulsacije rasta debljinske strukture; ω_D – koeficijent pulsacije rasta krošnje u širinu, $\omega_{h,ld,lk}$ – koeficijenti pulsacije rasta visinske strukture, g – gravitacijska konstanta visinske strukture; φ – fazni prostor rasta stabla. U kontekstu kompleksne nelinearne dinamike rasta, koeficijenti pulsacije debljinske i visinske strukture indiciraju točke fenomena rezonancije $\omega_d : \omega_h : \omega_D = 0.072993 : 0.1459854 : 0.1824817 = 1 : 2 : 2.5$. Period debljinskog prirasta je 100 godina, period visinskog prirasta je 50 godina, a period prirasta širenja krošnje je 25 godina. Omjeri prirasta su periodički 1:2:4. Rješenja kompleksnih jednadžbi su kompleksni brojevi, topološka dimenzija stabla. Preslika kompleksnih brojeva u faznom prostoru su dendrogrami u kojima okomiti smjerovi prikazuju amplitude ili multidimenzionalne vektore. Vodoravni smjerovi prikazuju prostor i vrijeme. Integracijom kompleksnih brojeva dobiva se prirast, a daljnjom integracijom rast debljinske i visinske strukture, fraktalna dimenzija stabla. Kompleksne jednadžbe skup su valnih funkcija koje predstavljaju moguća fizička stanja. Skup ima svojstva apstraktnog matematičkog objekta koji se zove apstraktni vektorski prostor. Skupovi svih fizički smislenih rješenja linearnih i valnih diferencijalnih jednadžbi uvijek tvore vektorske prostore, a njegovi vektori odredive su kompleksne funkcije prostora i vremena. Naizgled apstraktna teorija vektorskih prostora vodi na velika pojednostavljenja tijekom predviđanja budućeg razvoja sastojinske debljinske i visinske strukture. Kako bismo razumjeli kompleksno preslikavanje i fizička predviđanja koji se mogu i eksperimentalno izmjeriti, grafički možemo predočiti kompleksni vektorski prostor debljinskog prirasta i_d i rasta d, prirasta širenja krošnje i_D i promjera krošnje D, visinskog prirasta i_h i visinskog rasta h. Iskoristimo li kompleksni vektorski prostor i linearnu relaciju kako je kompleksni broj Ψ_d srednje sastojinskog stabla regresijska konstanta a debljinskog prirasta (Ψ_d= a), pomoću debljinskog rasta d_s i njegovog prirasta i_{ds} koeficijent regresije b izračuna se iz linearnog odnosa:

$$b = (i_{ds} - \Psi_{ds}) / d_s \rightarrow i_d = \Psi_d + b\,d \qquad (3)$$

Linearni odnos kompleksnog broja Ψ_d, prsnog promjera d i koeficijenta regresije b daje debljinski prirast i_d. Praktična formula za rekonstrukciju i numeričku procjenu debljinskog prirasta po debljinskim stupnjevima i dobnim razredima bez bušenja stabala Preslerovim svrdlom.



Graf 1. Kompleksni vektorski prostor debljinskog prirasta



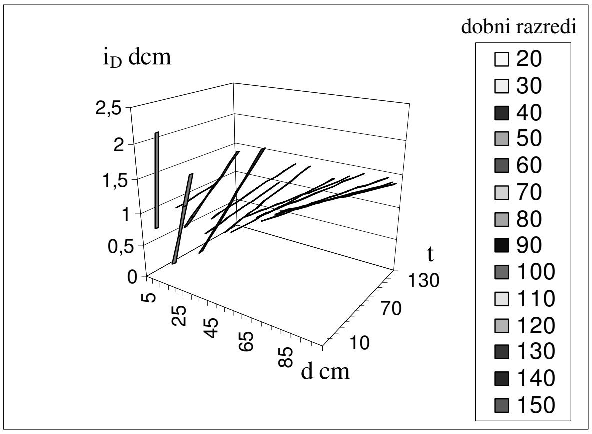
Graf 2. Razvojni tijek debljinskog rasta za karakteristična stabla

Na grafikonu (graf. 1) prikazan je kompleksni vektorski prostor sastojinskog debljinskog prirasta hrasta lužnjaka. Vidljiva je dinamika razvojnog tijeka sastojinskog tečajnog godišnjeg debljinskog prirasta po dobnim razredima. Dinamika razvojnog tijeka prirasnih nizova tečajnog godišnjeg debljinskog prirasta u potpunosti prati svu dinamiku razvojnog tijeka prirasnih nizova istraživanih sastojina. Na grafikonu (graf. 2) preslikan je razvojni tijek debljinskog rasta d karakterističnih stabala u strukturi sastojine, predominantnog stabla (najdebljeg), dominantnog, srednje sastojinskog, kodominantnog i podstojnog stabla s krošnjom koja umire. Na grafikonu (graf. 3) prikazan je kompleksni vektorski prostor prirasnih nizova širina krošanja. Razvojni tijek prirasnih nizova ukazuje na kritične periode minimalnog prirasta, pad prirasta širine krošnje svakih 25 godina. Kompleksni vektorski prostor rasta krošnje u širinu po dobnim razredima (graf. 4) pokazuje potpunu korelaciju s prsnim promjerom. Vrlo važna spoznaja za obračun optimalnog broja stabala N na jednom hektaru površine i procjenu obrasta sastojine. Omjer pod kojim se šire grane hrasta lužnjaka je 2.66423. Optimalna širina promjera krošnje hrasta lužnjaka može se izračunati iz linearnog odnosa prsnog promjera d i omjera univerzalne konstante ς = 2.66423 sa skaliranom vrijednošću $s\varsigma = 0.96761$.

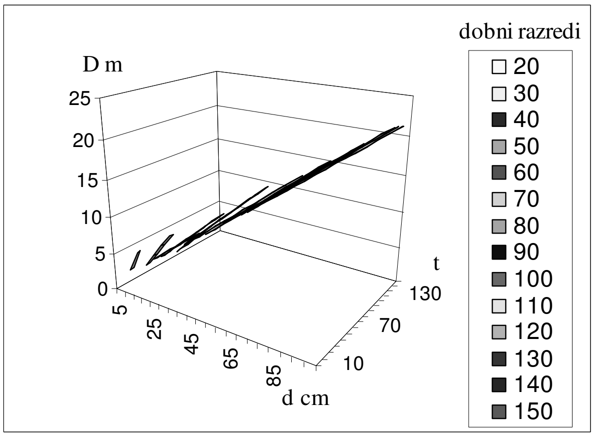
$$D = (\varsigma + s\varsigma) / \varsigma + (s\varsigma / 2\varsigma)\, d = 1.36318 + 0.18159\, d \qquad (4)$$

Optimalni broj stabala na jednom hektaru površine izračunava se preko optimalne širine krošnje srednje sastojinskog stabla D po formuli:

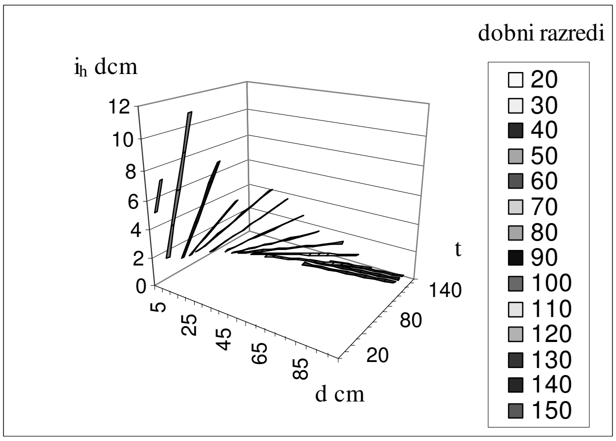
$$N = 10000 / D^2 * \pi / 4 \qquad (5)$$



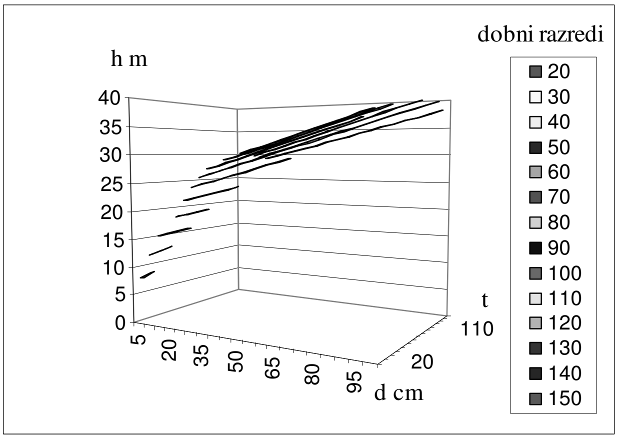
Graf 3. Kompleksni vektorski prostor prirasta širine krošnje



Graf 4. Kompleksni vektorski prostor rasta krošnje u širinu



Graf 5. Kompleksni vektorski prostor visinskog prirasta



Graf 6. Razvojni tijek visinskog rasta

Omjer veličina intervala između susjednih udvostručenja tijekom visinskog rasta je eigen-vrijednost 4.669, a omjer pod kojim se šire grane je 2.664. Ovakva udvostručenja poznata su pod nazivom bifurkacija i matematički su dokaz kaosa u šumi. Kaos se uzdiže uz deblo, grane i kulminira u vršnim grančicama. Grananje je opće prirodno načelo. Na grafikonu (graf 5) prikazan je kompleksni vektorski prostor visinskog prirasta. Vidljive su dvije kulminacije visinskog prirasta, prva prije dvadesete, a druga oko sedamdesete godine starosti sastojine. Poslije druge kulminacije visinskog prirasta, visinski prirast opada, a poslije 120. godine prestaje. Prostorno-vremenski razvoj visinskih krivulja hrasta lužnjaka po dobnim razredima jednoznačno je određen bifurkacijama za sva vremena. Odnos dužine debla i dužine krošnje strogo je matematički 0.533 : 0.467, a određuje ga amplituda dužine debla A_{hd} = 4.669 i amplituda dužine krošnje A_{lk} = 4.090, što će reći eigen-vrijednost δ =4.66920. Na grafikonu (graf 6) razvidna je zakrivljenost pete dimenzije. Ovakav razvojni tijek visinskih krivulja zakonitost je visinskog rasta i univerzalna je za sva vremena. Vrlo važna spoznaja za konstrukciju standardnih visinskih krivulja i jednoulaznih volumnih tablica. Bonitet staništa odražava se kroz sposobnost neke vrste drveća ili sastojine da na nekom tlu, pri normalnim klimatskim uvjetima i u određenom vremenu postigne određenu visinu i proizvede neki obujam drva po jedinici površine. Alati za numeričko bonitiranje staništa su kompleksne jednadžbe visinske strukture (2). Iteracijama otpora k visinskom rastu u kompleksnoj jednadžbi detektira se bonitet sastojine. Za dominantna stabla, vrijednosti otpora k manja od 0.050 preslikavaju I. bonitet sastojine, otpor k (0.051 – 0.060) preslikava II bonitet, otpor k (0.061 – 0.070) preslikava III bonitet, otpor k (0.071 – 0.080) preslikava IV bonitet, a otpor k veći od 0.081 preslikava V bonitet staništa ili ekološko-gospodarskog tipa. Kompleksne jednadžbe preslikavaju dinamiku rasta i razvoja šuma u šest dimenzija. Tri su prostorne, četvrta je vrijeme, peta je brzina, a šesta dimenzija diskretno je skrivena u titrajnom sustavu. Šume su titrajni sustavi koji postaju kaotični jer posjeduju element povratne veze, feedback effect.

3. Multidimenzijsko modeliranje dinamike rasta i razvoja šume

Koeficijent otpora rastu k stabla jedini je nelinearni član. Numerička klasifikacija strukture na stanja sastojina, kompleksnim jednadžbama rasta i razvoja debljinske strukture je jednostavna. Dovoljno je poznavati promjer stabla d i njegovu starost kako bi iteracijama koeficijenta otpora rastu k uskladili brzinu modela s brzinom debljinskog rasta stabla. Iteracijama k u intervalima 0.001 → 0.027 → 0.050 → 0.073 → 0.999 dobivamo disipativnu strukturu stabala u sastojini. Ista shema vrijedi i za rast krošnje u širinu. Vrijednosti koeficijenta otpora rastu $k < 0.027$ preslikavaju približno harmonično širenje krošnje, krošnje s otporom k 0.027 < 0.045 preslikavaju ravnotežni (stabilan) razvoj, krošnje s otporom k u rasponu 0.045 < 0.055 preslikavaju periodičan rast i razvoj, krošnje s otporom k u rasponu 0.055 < 0.073 su u stanju neperiodičnosti (nestabilnosti), a krošnje s koeficijentom otpora $k > 0.073$ u kaotičnom su stanju [3]. Iteracijama koeficijenta otpora rastu usklađujemo brzinu rasta modela s brzinom rasta stabla ili sastojine, istovremeno detektiramo disipativnu strukturu sastojine, drugim riječima obavljamo dijagnozu stanja stabilnosti šume. Iteracijama koeficijenta otpora rastu $k \leq 0.027$ modeliramo širinu goda ≥ 3.000 mm. Otporom debljinskom rastu $k < 0.027$ dobivamo grubu strukturu godova, jer preko 50% stabala ima godove šire od 3 mm. Koeficijent otpora debljinskom rastu 0.05

kritična je točka stabilnosti šume. Povećanjem otpora debljinskom rastu sastojina prelazi u nestabilno i neperiodično stanje. Kada je koeficijent otpora debljinskom rastu veći od koeficijenta pulsacije $k > \omega_d$ debljinski rast postaje kaotičan. Fina jednolična struktura furnirskih trupaca širine godova do 3 mm ima posebnu cijenu. Model optimalne produkcije visokovrijednih trupaca ima iznimnu važnost prihvaćanjem europskih normi kod razvrstavanja trupaca po kakvoći. Iteracijama otpora debljinskom rastu k = 0.0423 hrast lužnjak u 100. godini postiže srednji sastojinski prsni promjer 50 cm, prosječni debljinski prirast 5.000 mm i prosječnu širinu goda 2.500 mm. U debljinskoj strukturi sastojine 95% stabala ima finu strukturu godova. Drugim riječima s otporom debljinskom rastu k = 0.0423 dobivamo optimalnu debljinsku strukturu. Optimalna širina krošnje u toj dobi je 10.41 m. Sastojina je u stabilnom, ravnotežnom stanju. Optimalna produkcija najveće novčane vrijednosti drvnih sortimenata hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.) zahtjeva i optimalnu strukturu razvojnog tijeka debljinske distribucije stabala.

4. Prirasno prihodne tablice

Točno ili približno ponavljanje procesa u sustavu na analognom modelu naziva se simulacija. Određivanje apstraktnog modela i realizacija odgovarajućeg modela u nekom realnom sustavu naziva se modeliranje. Određivanje vladanja nekog sustava može se prema tome provesti analitički ili numerički polazeći od njegovog apstraktnog modela ili simuliranjem na fizikalnom modelu. U svim postupcima bitnu ulogu ima određivanje apstraktnog sustava kao matematičkog modela realnog sustava. Prirasno-prihodne tablice su jedan takav apstraktni model, itinerar rasta i razvoja šuma u prostoru i vremenu.

Glavna sastojina						Prorede			Zbroj proreda	Ukupna produkcija	Postotak tečajnog god.vol. prirasta	Tečajni godišnji volumni. prirast	Poprečni prirast	
God.	N	d_S	h_S	G	V	N	I	V					Glavne sastojine	Sveukupna Produkcija
		cm	m	m^2	m^3	kom	%	m^3			%	m^3		
10	4019	2.32	2.98	1.7	2.6					2.6			0.26	0.26
						2149	53.5	1.4	1.4		116.29	3.07		
20	1869	6.92	8.93	7.0	31.9					33.4			1.60	1.67
						919	49.1	15.7	17.1		21.84	6.98		
30	950	12.73	13.97	12.1	86.0					103.1			2.87	3.44
						389	40.9	35.2	52.3		10.29	8.85		
40	562	18.77	17.52	15.5	139.3					191.6			3.48	4.79
						182	32.4	45.2	97.4		7.03	9.79		
50	380	24.49	20.96	17.9	192,1					289.5			3.84	5.79
						101	26.6	51.2	148.6		5.44	10.44		
60	279	29.82	24.65	19.5	245.3					393.9			4.09	6.57
						62	22.3	54.8	203.3		4.31	10.58		
70	216	34.89	28.03	20.7	296.3					499.7			4.23	7.14
						43	20.1	59.5	262.9		3.50	10.37		
80	173	39.88	30.84	21.6	340.1					603.3			4.26	7.54
						32	18.3	62.2	325.0		2.99	10.18		
90	141	44.90	33.19	22.4	380.1					705.1			4.22	7.83
						24	16.9	64.2	389.3		2.62	9.97		
100	117	50.00	35.15	23.1	415.6					804.9			4.17	8.05
						18	15.7	65.4	454.6		2.28	9.47		
110	99	55.14	36.62	23.6	445.0					899.6			4.05	8.18
						14	14.6	64.9	519.5		1.96	8.72		
120	85	60.30	37.51	24.1	467.3					986.8			3.89	8.22
						12	13.7	64.1	583.6		1.66	7.74		
130	73	65.46	37.77	24.6	480.6					1064.2			3.70	8.19
						9	12.7	61.1	644.8		1.48	7.13		
140	64	70.61	37.80	24.9	499.4					1135.5			3.50	8.11
						8	12.0	58.7	703.05		1.37	6.74		
150	56	75.75	37.80	25.3	507.3					1202.9			3.33	8.02

Tablica 1. Prirasno prihodna tablica hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.), optimalnog stanja na I bonitetu

Prirasno prihodne tablice okvirni su model, itinerar rasta i prirasta sastojinske strukture u prostoru i vremenu. Univerzalni alati za konstrukciju prirasno-prihodnih tablica su kompleksne jednadžbe rasta i razvoja sastojinske debljinske i visinske strukture. Razvojni tijek debljinskog rasta srednjeg stabla d_s izračuna se kompleksnom jednadžbom 1, a razvojni tijek visinskog rasta h_s kompleksnom jednadžbom 2. Broj stabala na jednom hektaru površine N izračuna se formulom 5, a volumen sastojine V regresijskim modelom izjednačenja volumena stabla. Za hrast lužnjak (*Quercus robur* L.) regresijski model izjednačenja volumena stabla Schumacher-Hall-ovom funkcijom glasi:

$$v = 0.000042655\, d^{\,2.0629283}\, h^{\,0.9145876} \tag{6}$$

Konstrukcija prirasno-prihodnih tablica kompleksnim jednadžbama i regresijskim modelima u Excelu brza je i jednostavna. Maksimalni godišnji poprečni prirast sveukupne produkcije hrast lužnjak optimalnog stanja na I. bonitetu postiže u 120 godini. U toj dobi hrast lužnjak postiže srednji sastojinski prsni promjer 60.30 cm, srednju visinu 37.51 m, volumen sastojine 467.3 m^3/ha, volumni prirast 8.72 m^3/ha, sveukupnu produkciju 986.8 m^3/ha, a poprečni prirast sveukupne produkcije 8.22 m^3/ha.

4. Zaključak

Šuma je kaotični nelinearni dinamički sustav. Dinamički sustav je pravilo koje opisuje promjenu stanja u nekom prostoru u ovisnosti o vremenu. Pravila rasta šuma su kompleksne jednadžbe rasta i razvoja sastojinske debljinske i visinske strukture. Rješenja kompleksnih jednadžbi su kompleksni brojevi, a njihova preslika dendrogrami u kojima okomiti smjerovi prikazuju amplitude ili multidimenzionalne vektore. Kompleksni brojevi su skupovi koji predstavljaju moguća fizička stanja i tvore kompleksni vektorski prostor rasta i prirasta. Kompleksni brojevi topološka su dimenzija šume, a rast i prirast fraktalna dimenzija šume. Kompleksne jednadžbe rastenja kvalitativni su alati za kvantitativno, numeričko multidimenzijsko modeliranje rasta i razvoja šuma. Numeričkim multidimenzijskim modeliranjem dinamike rasta osiguravamo potrajnost gospodarenja šumama u svakom prostoru. Hrast lužnjak (*Quercus Robur* L.) kozmičko je drvo, ima jediničnu brzinu rasta.

5. Literatura

[1] Meštrović, Š., Fabijanić, G., (1995): Priručnik za Uređivanje šuma. Ministarstvo poljoprivrede i šumarstva; Hrvatske šume p.o. Zagreb, 1- 416 str., ISBN 953-6253-04-6, Zagreb.

[2] Bezak, K. (2007). Deterministički kaos u šumama. *DAAAM International Scientific Book 2007*, Katalinic, B. (urednik), str. 483-492, ISBN 3-901509-60-7, ISSN 1726-968, Vienna, Austria

[3] Bezak, K. (2008). Disipativna struktura šuma. *Zbornik radova sa 1st International Conference «Vallis Aurea» 2008,* Katalinic, B. (urednik) str. 61-67, ISBN, 978-953-98762-7-0, ISBN 978-3-901509-60-5, Požega, 19. rujna 2008. Požega – Beć, Hrvatska – Austrija

Photo 009. Passage / Prolaz