

SIMULACIJSKI MODEL UTJECAJA TEMPERATURE ZRAKA NA LISNE FENOFAZE HRASTA MEDUNCA NA OTOKU PAGU

SIMULATION MODEL OF THE EFFECT OF AIR TEMPERATURE ON THE LEAVES PHENOPHASES OF THE PUBESCENT OAK ON THE ISLAND OF PAG

Ljiljana ŠESTAN¹

Sažetak

Istraživanje utjecaja najznačajnijeg klimatskog čimbenika – temperature zraka na lisne fenofaze provedeno je razvojem simulacijskog modela sustava fenofaza. Zatim su na prethodno vrednovanom modelu provedeni eksperimenti s različitim vrijednostima temperature zraka. Fenološki podaci prikupljeni su na pokusnoj plohi u šumi medunca (*Quercus pubescens*, Willd.) na otoku Pagu, gdje su od šumarije Pag tijekom razdoblja od 1993. do 2005. godine vršena sustavna fenološka motrenja. Podaci o kretanju temperature zraka u promatranom razdoblju dobiveni su od Državnog hidrometeorološkog zavoda. Razvoj jasnog i jednostavnog modela prirodnih sustava, kao što je sustav fenofaza, svojevrsan je izazov i zahtijeva dobro poznavanje i samog sustava i metodologije. Problematika istraživanja prirodnih sustava ogleda se u njihovoj dinamičnosti i složenosti, koju je teško opisati i analizirati uz pomoć klasičnih metoda istraživanja, uglavnom temeljenih na linearnim vezama između elemenata nekog promatranog sustava. Osim toga, u prirodnim procesima je uvijek prisutna i određena razina nesigurnosti koju je potrebno ugraditi u model. U ovom istraživanju primijenjen je sustavsko-dinamički pristup uz pomoć kojega je razvijen model sustava lisnih fenofaza. Rezultati provedenih simulacijskih scenarija potvrdili su ključni utjecaj temperature zraka na lisne fenofaze šumskog drveća, ali i da sve fenofaze ne reagiraju jednako na temperaturne promjene, što je ujedno i predmet istraživanja ovoga rada.

KLJUČNE RIJEČI: fenologija, fenofaze, klimatske promjene, modeliranje, simulacija, sustavsko-dinamički pristup, hrast medunac

UVOD

Introduction

Fenologija² kao znanost koja proučava pojave bioloških ciklusa i njihovu povezanost s klimom, doživjela je, u kontekstu klimatskih promjena, preporod. Klimatske promjene bitno utječu na vremena pojavljivanja i trajanja godišnjih

doba koja se manifestiraju kroz izmjenu stanja lišća. Zamijećeno je da se vegetacijsko razdoblje produžuje te da proljeće započinje u prosjeku ranije, a zima sve kasnije (Menzel, 2000). Stoga, praćenje dužine vegetacijske sezone može otkriti klimatske promjene i pridonijeti razumijevanju kako vegetacija odgovara na klimatska kolebanja. Fenološka motrenja vrše se na izabranim opažackim mjestima, fenološkim

¹ Dr. sc. Ljiljana Šestan, Hrvatske šume d.o.o., Zeleni put bb, 53 291 Novalja, e-mail: ljiljana.sestan@hrsume.hr

² (grč. *Fainomai* – pojavljujem se, logos – pojam, *riječ*, misao, razum; engl. *phenology*, njem. *Fenologie*)

postajama, gdje se opaža određena biljna vrsta, te se bilježi dan pojave određene fenofaze. Razlikujemo lisne fenofaze i generativne fenofaze.

Proučavanje i praćenje fenofaza, koje su usko vezane za klimatske parametre, omogućilo je ekološka istraživanja putem modeliranja, analize i izrade studija o klimatskim promjenama (Jaagus i Ahas 2000). Većinom su dosadašnja istraživanja ove problematike vezana za klasične statističke metode, kao što su deskriptivna statistika, linearna regresija, korelacija, multipla regresija (Ahas i sur. 2000 i 2002, Broadmeadow i sur. 2005, Chmielewski i Rötzer 2001, Scheifinger 2002, Jaagus i Ahas 2000, Menzel 2000, Tikvić i sur. 2006), te u pojedinima slučajevima metoda kanoničke korelacijske analize (Chmielewski i Rötzer 2002). Najčešće korištena metoda linearne regresije pretpostavlja linearne veze između pojava, međutim odnosi između elemenata kompleksnih prirodnih sustava nisu uvijek linearni, te stoga primjena metode linearne regresije nije dostatna za razvoj modela cjelokupnog procesa bez gubljenja specifičnosti komponenti i uključujući utjecaj okoline (Šestan, 2010).

Važno je naglasiti da u istraživanju ove problematike, unatoč brojnim studijama, nije primijenjen sustavni pristup, već su pojedine vegetativne faze istraživane pojedinačno, te zatim uspoređivane (Menzel 2000, Ahas i sur. 2000). Sustavni pristup koji promatra cjelinu kao dio neke veće cjeline, odnosno proučava sustav i njegovu povezanost s okolinom, omogućava istraživanje veza između pojedinih fenofaza (elemenata sustava), kao i utjecaj okoline na sustav.

Podaci i metode

Data and methods

Da bi model oponašao stvarni sustav, izgradnja modela započinje analizom stanja u promatranom sustavu, odnosno izabranom objektu istraživanja (Lončar i sur. 2006). Istraživanje je obuhvatilo pokusnu plohu na otoku Pagu na kojoj su u 15-godišnjem razdoblju vršena sustavna fenološka motrenja. Pokusna ploha je smještena u okviru zaštićenog krajolika, posebnog rezervata šumske vegetacije "Dubrava-Hanzina", u neposrednoj blizini grada Paga. Radi se o ostatku autohtone vegetacije – panjači hrasta medunca s mjestimičnim crnim grabom, koja raste na smeđem tlu na vapnencu i dolomitu. S obzirom da se predmetna ploha nalazi na sjeveroistočnoj ekspoziciji, značajno je izložena buri i posolici. Stabla medunca su malih dimenzija, te je promjer srednje plošnog stabla 14,5 cm, a prosječna visina oko 6 m.

Važno je napomenuti da prilikom analize podataka fenoloških motrenja treba voditi računa da je sama lokacija fenološke plohe pod utjecajem lokalne klime i mikroklimе, što također utječe na pojavu fenofaza. Osim toga, fenološki ciklusi ovise o biljnoj vrsti i o genetskoj konstituciji biljke (Tikvić i sur. 2006). Prikupljeni su i obrađeni podaci fenoloških motrenja i podaci o temperaturama zraka.

Podaci fenoloških motrenja – Phenological observation data

Podaci o fenološkim motrenjima prikupljeni su od "Hrvatskih šuma" d.o.o. Motrenja su obavljena u razdoblju od 1.4.1993. do 31.12.2005. godine, u razmacima od 7 dana te su u datom razdoblju izvršena 666 puta. Na plohi je praćeno 10 stabala podjednake dimenzija, starosti i položaja u sastojini. Tijekom razdoblja motrenja došlo je do promjene u klasifikaciji fenofaza. Od 1993. do 2001. je praćeno deset, a od 2002. do 2005. sedam fenofaza. Različiti broj fenofaza objedinjen je na način da su podaci svake fenofaze pojedinačno promatrani i klasificirani prema novoj klasifikaciji. Na taj način je izdvojeno 6 fenofaza, koje su označene s F_0 do F_5 :

1. Mirovanje, svi su listovi otpali (F_0),
2. Početak listanja (F_1),
3. Lišće je potpuno razvijeno (F_2),
4. Lišće počinje mijenjati boju (F_3),
5. Lišće je potpuno promijenilo boju (F_4),
6. Lišće počinje opadati (F_5).

Prikupljanjem i organizacijom podataka fenoloških motrenja dobiveni su relevantni pokazatelji dinamike sustava fenofaza: učestalost pojedinih fenofaza, prosječno vrijeme pojave u godišnjem ciklusu i prosječna duljina trajanja tijekom godišnjeg ciklusa (tablica 1).

Kako bi se analizirala dinamika sustava, na temelju sistematiziranih podataka fenoloških motrenja utvrđene su, kao razlike stanja susjednih fenofaza, frekvencije prijelaza stabla iz fenofaze u fenofazu. Frekvencije prijelaza izražene su brojem stabala u jedinici vremena – tjedan (BS/tj). Nazvane su brzine prijelaza i označene s BP0-1, BP1-2, BP2-3, BP3-4, BP4-5 i BP5-0. Prijelaz stabala odvija se u različitim vremenskim intervalima, odnosno u godišnjim ciklusima. Stabla prelaze iz jedne u drugu fenofazu, kada nastanu uvjeti za prijelaz, odnosno kada ih na to potakne događaj iz okoline, u ovom slučaju – određena vrijednost temperature zraka. Nakon što sva stabla prijeđu u sljedeću fenofazu, na

Tablica 1. Učestalost, vrijeme pojave i duljina trajanja fenofaza
Table 1 Frequency, time of occurrence and duration of phenophases

Fenofaza Phenophase	Broj opažanja Frequency	Vrijeme pojave (mjesec) Time of occurrence (in month)	Duljina trajanja (tijekom mjeseca) Duration (during months)
F0	248	12	1,2,3
F1	79	4	4
F2	348	4–poč.5	5,6,7,8,9
F3	83	10	10
F4	75	10–11	11
F5	64	11–12	11,12

Tablica 2 Prosječne brzine prijelaza veće od nule**Table 2** Average speed of transitions larger than 0

BP0-1	BP1-2	BP2-3	BP3-4	BP4-5	BP5-0
BS/tj					
3,17	3,71	3,25	3,1	2,7	7,5

primjer iz F_0 u F_1 , brzina prijelaza iz F_0 u F_1 (BP0-1) je 0, odnosno stabla više te godine ne prelaze, nego tek u iduće. Na temelju prikupljenih podataka izdvojene su brzine prijelaza veće od 0 te je izračunat prosječan broj stabla koji u tim intervalima tjedno prelazi (tablica 2).

Za potrebe razvoja simulacijskog modela sustava fenofaza, a na temelju prethodne analize podataka, može se utemeljeno tvrditi da je dinamika sustava u razdoblju od 1.1. do 1.4.1993. godine, kada su fenološka motrenja službeno počela, odgovarala stanju mirovanja. Na taj način dobiven je cjeloviti godišnji ciklus, što je značajno za razvoj modela i kasnije provođenje eksperimenata.

Podaci o temperaturama zraka – Data on air temperatures

Relevantni vanjski čimbenik koji značajno utječe na sustav fenofaza je temperatura zraka, koja bilježi značajne promjene tijekom proteklog 20. stoljeća. Utvrđeno je da se tijekom dvadesetog stoljeća srednja globalna temperatura zraka povisila u prosjeku za 0,6 °C (Ahas i sur. 2002). Oscilacije temperature zraka posebno su značajne tijekom zime i proljeća, što značajno utječe na proljetne fenofaze (Ahas 2000). Za potrebe ovoga rada DHMZ je ustupio podatke o srednjim dnevnim temperaturama zraka na po-

dručju grada Paga za razdoblje od 1.1.1993. do 31.12.2005. (4748 podataka). Na temelju prikupljenih podataka izračunato je da je prosječna temperatura zraka u promatranom razdoblju iznosila 16,02 °C, a prosječne mjesečne temperature zraka iznosile su kako je prikazano u tablici 3.

Srednje dnevne temperature zraka osnova su za izračunavanje srednjih tjednih temperatura zraka, jer je vremenski korak modela 1 tjedan. Proveden je postupak određivanja karakterističnih distribucija, uz pomoć alata Statistica 7, za srednje tjedne temperature zraka za sve fenofaze, kada su one prisutne, odnosno kada je stanje fenofaze veće od 0. Navedene srednje tjedne temperature zraka pripadajućih fenofaza označene su: TZF0, TZF1, TZF2, TZF3, TZF4 i TZF5 te je za njih utvrđena i deskriptivna statistika (tablica 4.)

Prema rezultatima χ^2 i Kolmogorov-Smirnov (KS) testa u tablici 5, uz razinu signifikantnosti $\alpha=0.05$, sve distribucije srednjih tjednih temperatura zraka kada su fenofaze prisutne odgovaraju normalnoj distribuciji. Na taj su način utvrđene karakteristične distribucije.

Razvoj i vrednovanje simulacijskog modela – Development and validation of simulation model

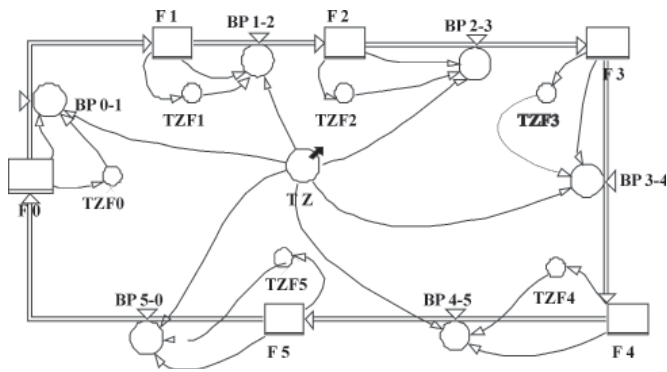
Razvoj simulacijskog modela uz pomoć kojega će se istražiti utjecaj temperature zraka na sustav lisnih fenofaza, započinje razvojem verbalnog modela, kojim je u nastavku opisan promatrani sustav. Pretpostavka je da je dinamika pojedinih fenofaza pod ključnim utjecajem temperature zraka. Stanje fenofaza kreće se u rasponu od 0 do 10, jer je na pokusnoj plohi praćeno 10 stabala. Znači da stanje fenofaza ne može biti veće od 10 niti manje od 0. Na stanje fenofaze utječe prijelaz stabala iz prethodne fenofaze

Tablica 3. Prosječne mjesečne temperature u promatranom razdoblju °C**Table 3** Average monthly air temperatures in observed period (°C)

Mjesec / Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	x
°C	7,2	7,5	10,4	13,7	19,5	23,5	25,9	26,0	20,7	17,1	12,2	8,6	16,02

Tablica 4. Deskriptivna statistika za TZF0–TZF5**Table 4** Descriptive statistics for TZF0...TZF5

Deskriptivna statistika Descriptive statistics	Srednje tjedne temperature zraka fenofaza (°C) Average week air temperatures (°C)					
	TZF0	TZF1	TZF2	TZF3	TZF4	TZF5
Aritmetička sredina / arithmetic mean	9,2	15,2	21,8	15,1	11,4	9,9
Medijan / median	9,2	15,0	22	15,0	10,4	9,4
Standardna devijacija / standard deviation	3,1	3,3	4,4	3,8	3,5	3,3
Broj podataka / number of data	246	77	346	81	74	59
Min.	1,8	8,9	8,9	5,7	5,7	3,0
Max.	18,8	23,4	30,3	26,9	20,2	20,2



Slika 1: Dijagram toka sustava fenofaza

Figure 1: Flowchart of the system of phenophases

i prijelaz u sljedeću fenofazu. Prijelaz u sljedeću fenofazu ovisi o utjecaju srednje mjesečne temperature zraka i prosječne temperature zraka prethodne fenofaze. Znači kad su zadovoljeni određeni uvjeti, vezano za vrijednosti srednje mjesečne temperature zraka i prosječne temperature zraka prethodne fenofaze, dolazi do prijelaza u sljedeću fenofazu. Prijelaz stabala u sljedeću fenofazu dovodi do povećanja stanja te sljedeće fenofaze i smanjenja stanja prethodne fenofaze, što znači da je uzročno-posljedična veza negativna. Postoji i veza između prosječne temperature zraka pojedine fenofaze i stanja fenofaze. Kad je fenofaza prisutna, prisutna je i njezina prosječne temperature zraka, a kada je stanje fenofaze jednako 0, onda je i prosječna temperature zraka pojedine fenofaze jednaka 0.

Za razvoj simulacijskog modela promatranog sustava fenofaza odabran je objektno orijentiran program POWERSIM Studio Academic 2003. Osnovni koraci razvoja modela: planiranje simulacijskog projekta, izbor kalendara, definiranje mjernih jedinica, definiranje i izgradnja varijabli, veza i tokova (dijagrama toka), definiranje postavki simulacijskog eksperimenta, provođenje eksperimenata i izrada prikaza i analiza rezultata simulacije (dijagrama, grafikona, tablica, itd). Dijagram toka i računalni model gradimo uz pomoć simbola, koji označavaju: jednađbe stanja razine sustava (Level), jednađbe promjene stanja razine sustava (Rate), pomoćne jednađbe (Auxiliary), jednađbe konstanti (Constants) i jednađbe početnih vrijednosti. Razine, konstante, jednađbe promjene stanje i pomoćne jednađbe se povezuju tokovima (Šestan i Dušak, 2011). Vremenski korak modela je 1 tjedan (1 week = wk) i odgovara vremenskom intervalu u kojemu su vršena fenološka motrenja. Odabran je kalendar *bank* i definirane su potrebne mjerne jedinice. Stanje fenofaza izraženo je brojem stabala te je stoga dodana jedinica BS. Model je prikazan na slici 1.

Razine u modelu prikazanom na slici 1 su stanja fenofaza od F_0 do F_5 , koja su pod utjecajem brzine prijelaza stabala iz fenofaze u fenofazu (BP0-1, BP1-2,...,BP5-0). Granične temperature zraka u jednađbama brzina prijelaza utvrđene su na temelju analize i usklađivanja poznatih stanja fenofaza,

kretanja temperatura zraka i modela. Brzina prijelaza ovisi o vrijednosti varijable TZ – srednje mjesečne temperature zraka, koja je definirana unosom realnih vrijednosti po jedinici vremena i vrijednosti slučajnih varijabli TZF0, TZF1,...,TZF5 za koje su utvrđene normalne distribucije. Izuzetak je brzina prijelaza BP5-0, koja je definirana stanjem fenofaze F_5 , jer čim stablima počne opadati lišće ona prelaze u mirovanje. Početna stanja razina sustava su jednaka zabilježenom stanju fenofaza na dan 1.1.1993. godine, koja su izražena brojem stabala (BS). S obzirom da se radi o mirovanju vegetacije, početno stanje fenofaze F_0 je 10 (BS), a ostalih fenofaza iznosi 0 (BS).

Rad s programskim alatom POWERSIM omogućuje transfer podataka s programom EXCEL, te je radi vrednovanja modela, praćenja stanja sustava i usporedbe dinamike prosječnih temperatura zraka stvarnog sustava i modela, model nadopunjen pomoćnim jednađbama. Ukupno stanje temperatura zraka fenofaza definirano je sljedećom pomoćnom jednađbom (1):

$$UTZF = \text{sum}(TZF0;TZF1;TZF2;TZF3;TZF4;TZF5)(1)$$

Jednađbom (2) definiran je broj prisutnih temperatura zraka, gdje funkcija COUNTGT daje broj elemenata u nizu, čija je vrijednost veća od 0.

$$BTZF = \text{COUNTGT}(\{TZF0;TZF1;TZF2;TZF3;TZF4;TZF5\};0)(2)$$

Jednađbom (3) definiran je tjedni prosjek temperatura zraka fenofaza:

$$PTZF = UTZF / BTZF(3)$$

Da bi se utvrdilo reprezentira li model na zadovoljavajući način stvarni sustav, kontinuirano se provodi postupak

Tablica 5. Rezultati χ^2 i Kolmogorov-Smirnov testa

Table 5 The results of the Chi-square and Kolmogorov-Smirnov tests

	χ^2 -test Chi square-TEST		Kolmogorov-Smirnov test KS test		H_0/H_1
	χ^2 max	Granična vrijednost χ^2 za 0,05 Border (critical) Value χ^2 for 0,05	D max	Granična vrijednost D za 0,05 Border (critical) value D for 0,05	
TZF0	0,990	9,49	0,029	0,086	H_0
TZF1	1,149	9,49	0,068	0,155	H_0
TZF2	12,78	12,6	0,068	0,073	H_0
TZF3	1,867	9,49	0,082	0,151	H_0
TZF4	8,466	12,6	0,122	0,158	H_0
TZF5	5,182	7,81	0,139	0,177	H_0

stvaranja povjerenja u simulacijski model, kroz verifikaciju i validaciju modela. U slučaju modela sustava fenofaza, postupak stvaranja povjerenja u model zahtijevao je u više navrata modifikaciju modela, i to kroz izmjenu strukture modela i izmjenu definicija pojedinih varijabli. Primjena programskog paketa POWERSIM Studio 2003 Academic olakšava prijelaz na računalski model, jer se programski kod generira paralelno s izgradnjom dijagrama toka. Znači da se već kroz paralelnu izgradnju dijagrama toka i računalskog modela, a na temelju strukturiranog dijagrama, vrši verifikacija usklađenjem strukture, dijagrama toka i matematičko-računalskog modela (Šestan i Čavlović, 2007). Verifikacija je provedena i izvođenjem eksperimenata s različitim sjemenom za korištenje slučajnih brojeva (u jednadžbama TZF1,...,TZF5 za koje su utvrđene normalne distribucije) kao i ponavljanjem eksperimenata s istim sjemenom.

Postupak vrednovanja modela proveden je kao replikativno vrednovanje. Rezultati replikativnog vrednovanja (tablica 6), gdje je opaženo stanje uspoređeno sa simuliranim za razdoblje od 1.1.1993. do 31.12.2005. pokazuju da se dinamika dobivena simulacijom i dinamika realnog sustava značajno ne razlikuju. Razlike prisutne u slučaju fenofaza F₅ i F₀ vezane su za odabrani vremenski korak modela i kalendar simulacijskog projekta.

Izvršena je i usporedba realne srednje mjesečne temperature zraka (TZ) i simuliranog tjednog prosjeka temperatura zraka fenofaza (PTZF) provođenjem odgovarajućih testova: t-test za ovisne uzorke, Sign test i Wilcoxon Matched Pairs test, uz pomoć programa STATISTICA 7. Svi navedeni testovi koriste se za povezane uzorke, što odgovara potrebama usporedbe razlika između varijabli TZ i PTZF, jer se radi o varijablama koje potiču iz iste populacije temperatura zraka. Rezultati testova da razlika između TZ i PTZF nije značajna, prikazani su u tablici 7.

Simulacijski model treba zadovoljiti prihvatljivu razinu pouzdanosti, kako bi se zaključci na temelju ponašanja modela mogli tretirati kao ispravni i primjenjivi na stvarni sustav.

Tablica 6: Rezultati vrednovanja modela
Table 6: Results of the model validation

Fenofaze Phenophases	Prosječno vrijeme pojavljivanja (mjesec) Average time of occurrence (month)	
	Stvarno / Real	Simulirano / Simulated
	F1	4
F2	4– poč.5	4
F3	10	10
F4	10–11	10–11
F5	11–12	11
F0	12	11–12

Tablica 7. Rezultati t-testa, Sign test i Wilcoxon Matched Pairs test
Table 7 Results of the t-test, Sign test i Wilcoxon Matched Pairs test

T-test				
Statistica 7	t _{tab}			
0,513507	1,98			
Par varijabli Pair of Variables	Sign Test Test je signifikantan kod p < 0,05 Marked tests are significant at p < ,05000			
	Broj nevezanih No. of Non-ties	Postotak Percent v < V	Z	p-vrijednost p-value
TZ i PTZF	156	49,35897	0,080064	0,936186
Par varijabli Pair of Variables	Wilcoxon Matched Pairs test Test je signifikantan kod p < 0,05 Marked tests are significant at p < ,05000			
	Broj važećih Valid N	T	Z	p-vrijednost p-value
TZ i PTZF	156	6026,000	0,171630	0,863729

S tim u skladu može se zaključiti da model sustava fenofaza dobro oponaša stvarni sustav i da se na temelju njegovog ponašanja, provođenjem simulacijskih eksperimenata, mogu donositi zaključci o ponašanju realnog sustava fenofaza.

Rezultati Results

Simulacijski eksperimenti – Simulation experiments

Način na koji pojedine fenofaze reagiraju na temperaturne promjene u okolini istražen je putem simulacijskih eksperimenata. Oni su, u skladu s dužinom promatranog razdoblja, provedeni za 13-godišnje razdoblje (od 1.1.2006. do 30.12.2018) te su uvrštene promjene temperature zraka koje

Tablica 8: Rezultati scenarija 1–6
Table 8 Results of the scenarios 1–6

Fenofaza Phenophase	Prosječno vrijeme pojavljivanja – mjesec The average time of appearance – month					
	Scenarij / Scenario					
	1	2	3	4	5	6
F1	4	4	3–4	3–4	3	4
F2	4	4	4	4	4	4–5
F3	10	10	10	10	10	10
F4	10–11	10–11	10–11	11	11	10
F5	11	11	11	11	11	11
F0	11–12	11–12	12–kraj 11	12	12	11

Tablica 9. Rezultati scenarija 1–6 na početku svake godine – stanje fenofaza (BS)**Table 9** Results of the scenarios 1–6 at the beginning of each year – state of phenophases (BS)

Time	F 0	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5
1.1.2006	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2007	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2008	9,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27
1.1.2009	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2010	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2011	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2012	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2013	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2014	2,80	0,00	0,00	0,00	1,07	6,13
1.1.2015	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2016	5,42	0,00	0,00	0,00	1,34	3,24
1.1.2017	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2018	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Non-commercial use only!

Time	F 0	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5
1.1.2006	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2007	8,93	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07
1.1.2008	9,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27
1.1.2009	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2010	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2011	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2012	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2013	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2014	2,80	0,00	0,00	0,00	1,07	6,13
1.1.2015	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2016	5,42	0,00	0,00	0,00	1,34	3,24
1.1.2017	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2018	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Non-commercial use only!

Time	F 0	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5
1.1.2006	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2007	7,92	0,00	0,00	0,00	0,00	2,08
1.1.2008	9,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27
1.1.2009	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2010	9,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,53
1.1.2011	3,10	0,00	0,00	0,00	0,00	6,90
1.1.2012	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2013	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2014	2,32	0,00	0,00	0,00	3,42	4,26
1.1.2015	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2016	5,42	0,00	0,00	0,00	1,87	2,71
1.1.2017	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2018	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Non-commercial use only!

Time	F 0	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5
1.1.2006	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2007	5,42	0,00	0,00	0,00	0,00	4,58
1.1.2008	9,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27
1.1.2009	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2010	9,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,53
1.1.2011	3,10	0,00	0,00	0,00	0,00	6,90
1.1.2012	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2013	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2014	2,28	0,00	0,00	0,00	3,52	4,20
1.1.2015	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2016	4,79	0,00	0,00	0,00	2,50	2,71
1.1.2017	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2018	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Non-commercial use only!

Time	F 0	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5
1.1.2006	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2007	2,71	0,00	0,00	0,00	0,00	7,29
1.1.2008	9,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27
1.1.2009	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2010	9,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,53
1.1.2011	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2012	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2013	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2014	0,00	0,00	0,00	0,00	6,13	3,87
1.1.2015	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2016	2,71	0,00	0,00	0,00	4,58	2,71
1.1.2017	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2018	8,40	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60

Non-commercial use only!

Time	F 0	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5
1.1.2006	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2007	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2008	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2009	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2010	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2011	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2012	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2013	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2014	6,58	0,00	0,00	0,00	1,07	2,35
1.1.2015	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2016	7,33	0,00	0,00	0,00	0,00	2,67
1.1.2017	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1.2018	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Non-commercial use only!

su do sada zabilježene (povišenje globalne temperature zraka u prethodnom stoljeću u prosjeku za 0,6 °C) te promjene u skladu s klimatskim studijama Vlade Republike Hrvatske (Ministarstvo okoliša, 2006), gdje se predviđeni

porast temperature zraka u RH, kao i za područje Europe, kreće se od 0,1 do 0,4 °C po desetljeću, odnosno godišnje od 0,01 do 0,04 °C. Simulacijski scenariji 1–6 planirani su kako slijedi:

Scenarij 1: nepromijenjene vrijednosti temperature zraka.

Scenarij 2: prosječni porast temperature zraka od 0,01 °C godišnje. Prosječna TZ u simuliranom razdoblju se povećala s 16,02 °C na 16,15 °C.

Scenarij 3: prosječni porast temperature zraka od 0,04 °C godišnje. Prosječna TZ u simuliranom razdoblju se povećala s 16,02 °C na 16,54 °C.

Scenarij 4: prosječni porast temperature zraka od 0,06 °C godišnje. Prosječna TZ u simuliranom razdoblju se povećala s 16,02 °C na 16,80 °C.

Scenarij 5: prosječni porast temperature zraka od 0,13 °C godišnje. Prosječna TZ u simuliranom razdoblju se povećala s 16,02 °C na 17,71 °C.

Scenarij 6: pad temperature zraka od 1 °C tijekom simulacijskog razdoblja. Prosječna TZ u simuliranom razdoblju se smanjila s 16,02 °C na 15,02 °C.

Rezultati prethodno navedenih scenarija, u smislu prosječnog vremena pojave pojedine fenofaze prikazani su u tablici 8.

Iz podataka u tablici 8. može se zaključiti da prema scenariju 1 i 2 nema promjena u prosječnom vremenu nastupa fenofaza te da je porast temperature zraka doveo, u scenarijima 3, 4 i 5, do prosječno ranijeg pojavljivanja fenofaze F₁ i kasnijeg pojavljivanja fenofaza F₄ i F₀. Planirani porast temperature zraka nije utjecao na prosječno vrijeme pojavljivanja fenofaza F₃ i F₅. Pad temperature zraka (scenarij 6) utjecao je na kasnije prosječno pojavljivanje fenofaze F₂ i ranije pojavljivanje fenofaza F₄ i F₀. Stoga se može zaključiti da promjene temperature zraka uključene u scenarije 2 do 6 utječu različito na pojedine fenofaze, s tim da su fenofaze F₃ i F₅, u prosjeku manje osjetljive na utjecaj temperature zraka. Fenofaza F₁ je najosjetljivija na porast temperature zraka, a zatim i fenofaze F₄ i F₀. Na pad temperature zraka su osjetljive fenofaze F₂, F₄ i F₀.

Stanje fenofaza na početku svake godine (prvog siječnja) simuliranog razdoblja u slučaju scenarija 1–6 prikazano je u tablici 9. Iz podataka je vidljivo da i minimalno povećanje temperature zraka od 0,01 °C godišnje dovodi do promjena u dinamici fenofaza, jer je u usporedbi 1 i 2 scenarija prisutna razlika u 2007 godini, odnosno zadržavanje stabala u fenofazi F₅. Usporedbom rezultata dobivenih prema prvom scenariju s rezultatima 3, 4 i 5 scenarija vidljivo je da daljnje povećanje temperature zraka još više utječe na kasniji prijelaz stabala u fazu mirovanja. U slučaju pada temperature zraka stabla brže prelaze u fazu mirovanja, što proizlazi iz usporedbe rezultata 1 i 6 scenarija. U tablici 10 dana su vremena pojave fenofaza u zadnjoj godini simulacijskog razdoblja za scenarije 1 do 6. Prema podacima u tablici može se zaključiti da porast temperature zraka uključen u scenarije 2, 3 i 4 utječe u manjoj mjeri na dinamiku fenofaza na kraju simulacijskog razdoblja. Ekstremniji porast tempera-

Tablica 10. Vrijeme nastupa fenofaza u zadnjoj 2018. godini za scenarije 1–6

Table 10 Time of occurrence of phenophases in the last year 2018 for scenarios 1–6

	Scenarij / Scenario					
	1	2	3	4	5	6
F1	8.4.	8.4.	8.4.	8.4.	1.4.	15.4.
F2	29.4.	22.4.	22.4.	22.4.	15.4.	29.4.
F3	10.10.	17.10.	17.10.	17.10.	24.10.	10.10.
F4	24.10.	24.10.	24.10.	24.10.	1.11.	24.10.
F5	8.11.	8.11.	8.11.	8.11.	29.11.	8.11.
F0	29.11.	29.11.	29.11.	29.11.	20.12.	29.11.

ture zraka prema scenariju 5 bitno utječe na sustav i ima za posljedicu vremenski pomak u pojavljivanju svih fenofaza. Pad temperature zraka od 1°C na kraju 13-godišnjeg razdoblja utjecao je na kasnije pojavljivanje fenofaze F₁, ali nije utjecao na ostale fenofaze u zadnjoj godini simulacijskog razdoblja.

Zaključci Conclusions

U ovom slučaju prikazana metodologija omogućila je razvoj modela sustava lisnih fenofaza na temelju sustavske analize i sustavske dinamike. S razvijenim modelom provedeno je istraživanje utjecaja temperature zraka na lisne fenofaze kroz scenarije od 1 do 6. Rezultati tih istraživanja pokazali su da su na oscilacije temperature zraka, u prosjeku, najosjetljivije fenofaze F₁ (početak listanja), F₄ (lišće je potpuno požutilo) i F₀ (lišće je potpuno otpalo) i to najprije fenofaza F₁, koja prva reagira na promjenu. Može se zaključiti da su biljke najosjetljivije na utjecaj temperature zraka na početku vegetacijskog ciklusa, što je u skladu s rezultatima dosadašnjih istraživanja (Ahaas i sur, 2002). Zanimljivo je i da su fenofaze F₃ i F₅ pokazale najmanju osjetljivost na promjene temperature, u smislu prosječnog vremena pojavljivanja. Takav rezultat simulacijskih eksperimenata ukazuje da su te fenofaze značajnije utjecane od strane nekog drugog čimbenika, čiji utjecaj nije ugrađen u model, kao što je na primjer vjetar koji bitno utječe na proces opadanja lišća.

Primjena modela fenofaza je višestruka. Osim praćenja utjecaja temperaturnih promjena na vegetacijski ciklus, on može poslužiti i za praćenje različitih drugih utjecaja na promatrani sustav, kao što su pojave različitih biljnih štetnika, čije djelovanje dovodi do promjena na lišću (golobrst) ili za proučavanje utjecaja proljetnog mraza na otpadanje lišća i pojavu sekundarnog listanja. Osnovne postavke modela su prenosive na druge plohe na kojima se vrše fenološka

motrenja, na kojima su takve pojave prisutne i registrirane, stoga bi model svakako trebalo iskoristiti i u analizi i prognozi zdravstvenog stanja šume.

Na kraju je važno naglasiti da se cjelokupni rad bazira na interdisciplinarnom znanstvenom pristupu. Sinteza matematičkih, statističkih, informatičkih i bioloških metoda rezultirala je novom znanstvenom interdisciplinarnom metodikom koju je moguće primijeniti na parametrizaciju i formalizaciju kompleksnih prirodnih sustava.

Literatura References

- Ahas R, A. Aasa, A. Menzel, V.G. Fedotova and H. Scheifinger. 2002: Changes in European spring phenology, *International Journal of Climatology*, No 22: 1727–1738.
- Ahas R., J. Jaagus, A. Aasa, 2000: The phenological calendar of Estonia and its correlation with mean air temperature, *International Journal of Biometeorology*, 44(4): 159–16.
- Broadmeadow M.S.J., D. Ray and C.J.A. Samuel, 2005: Climate change and the future for broadleaved tree species in Britain, *Forestry*, Vol 78, No.2.145–161., Oxford
- Chmielewski F-M., T. Rötzer, 2001: Response of tree phenology to climate change across Europe, *Agricultural and Forest Meteorology*, 108: 101–112.
- Chmielewski F-M., T. Rötzer, 2002: Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes, *Climate Research* 19: 257–264.
- Jaagus J., R. Ahas, 2000: Space-time variations of climatic seasons and their correlation with the phenological development of nature in Estonia, *Climate Research* 15(3): 207–219.
- Lončar Lj., M. Hell, V. Dušak, 2006: A System Dynamics Model Of Forest Management, U: Proceedings of the 28th International Conference on Information Tehnology, ITI 2006., Cavtat/Dubrovnik.
- Lucas N.S., P.J. Curran, 1999: Forest ecosystem simulation modelling, The role of remote sensing, *Progress in Physical Geography*, 23: 391.
- Menzel A., 2000: Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996., *International Journal of Biometeorology*, 44(2): 76–81.
- Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog planiranja i graditeljstva, 2006: Nacional report of Republic Croatia according to the UN Framework Convention on Climate Change (UN-FCCC), Zagreb
- Tikvić, I., Z. Seletković, D. Ugarković, 2006: Odnos razvoja fenoforni hrasta lužnjaka i mikroklima šumskog tla, *Glasnik za šumske pokuse*, pos. izd 5, 91–104., Jastrebarsko
- Scheifinger, H., A. Menzel, E. Koch, C. Peter and R. Ahas. 2002: Atmospheric mechanisms governing the spatial and temporal variability of phenological phases in central Europe, *International Journal of Climatology*, 22: 1739–1755.
- Seila, A.F., V. Čerić, P. Tadikamalla, 2003: Applied Simulation Modeling, Thomson Books Cole, USA
- Šestan, Lj., 2010: Konceptualni model nelinearnih dinamičkih eko-sustava, Disertacija, Fakulteta organizacije i informatike, Varaždin
- Lj. Šestan, J. Čavlović, 2007: Razvoj simulacijskog modela regularne šume, *Radovi – Šumarski institut Jastrebarsko* 42 (1): 19–33.
- Šestan, Lj., V. Dušak, 2011: A system dynamics approach to the modelling of the complex natural systems, 25th European Conference on Modelling and Simulation, European Council for Modelling and Simulation, 115., Krakow, Poland

Summary

The impact of climate change has been observed in case of occurrence and duration of seasons which in deciduous forest manifest through changing of the leaves. Monitoring changes in the development of leaves was carried out through phenological observations, where specific change corresponds to a particular phenophase. In researching this issue, despite numerous studies, phenophases have not been studied as a system, but individually and then compared (e.g. Ahas et al., 2002; Menzel, 2000). Most previous studies of this issue were related to classical statistical methods, such as descriptive statistics, linear regression, correlation, multiple regression (e.g. Ahas et al., 2002; Chmielewski and Rötzer, 2001; Menzel, 2000). The most commonly used method, the method of linear regression, assumes a linear relationship between phenomena. However, as relations between elements of complex natural system are not always linear, the application of the linear regression method is not sufficient for the development of a model of the entire process, without losing specific components and including the environmental influence (Šestan 2010). Therefore, in this study, to model and study the effect of air temperature on the system of phenophases, the system-dynamic principle was applied.

The research of the impact of the most important climatic factor – air temperature, on the phenophases, was conducted on experimental plot in the pubescent oak forest (*Quercus pubescens*) on the island of Pag (Adriatic Sea). Systematic phenological observations were carried out there during period 1993–2005. Six phenophases marked as F0, F1...F5, were distinguished:

1. Dormant vegetation, all the leaves have fallen (F0),
2. Leaves begin to develop (F1),
3. Leaves are fully developed (F2),
4. Leaves begin to change colour (F3),
5. Leaves have completely changed colour (F4),
6. The leaves begin to fall (F5).

The relevant indicators of the dynamics of phenophases were obtained by collecting and organizing data through phenological observations: average time of appearance in the annual cycle, the average duration of the annual cycle and the frequency of certain phenophases (table 1). Based on systematic observations of phenological data, the frequency of crossing between phenophases was determined as the neighbouring phenophases state differences (table 2). Data on the dynamics of air temperature were obtained from the State Meteorological and Hydrological Institute. The process of determining the characteristic distribution was carried out for the weekly mean air temperature for all phenophases when they are present, or when the state of phenophase is greater than 0 (table 5).

Gathered and processed data have allowed the building of the simulation model of the system of phenophases. Simulation model was based on system-dynamic approach (figure 1). In order to determine whether the model represents the real system satisfactorily, the process of model validation was carried out (table 6 and table 7).

The research of the influence of air temperature on leaf phenophases was conducted with the developed model, through different scenarios from 1 to 6. The results of the simulated scenarios (table 8, 9 and 10) confirmed the crucial influence of temperature on the leaves phenophases. The results of these studies have shown that on average, phenophases F1, F4 and F0, are the most sensitive on the fluctuations in air temperature, but above all F1 as first that reacts to change. However, they also showed that all phenophases are not equally responsive to temperature changes. It is interesting that phenophases F3 and F5 showed the least sensitivity to temperature changes, in terms of average time of occurrence. Such result of the simulation experiments indicates that those phenophases are significantly influenced by other factors.

KEY WORDS: phenology, phenophases, climate changes, modelling, simulation, system-dynamic approach, pubescent oak