

Agrovoc descriptors: phenology, ecology, data collection, meteorological observations, monitoring, wild plants, plants, crops, domestication

Agris category codes: F40, F70, P40

Univerza v Ljubljani
Biotehniška fakulteta
Oddelek za agronomijo

COBISS koda 1.01

Modeliranje fenološkega razvoja pri rastlinah

Zalika ČREPINŠEK¹, Lučka KAJFEŽ-BOGATAJ²

Delo je prispelo 6.septembra 2005; sprejeto 20.septembra 2005.
Received September 6, 2005; accepted September 20, 2005.

IZVLEČEK

Proučevali smo možnosti napovedovanja fenološkega razvoja gojenih in samoniklih rastlin na osnovi meteoroloških spremenljivk v Sloveniji za obdobje 1955-2000. Povezanost med fenološkim razvojem in meteorološkimi spremenljivkami smo proučevali s korelacijsko analizo in z multiplo linearno regresijo. Vrednosti korelacijskih koeficientov med nastopom fenofaz ter povprečni temperatur zraza dveh ali treh zaporednih mesecev pred nastopom fenofaz so bile visoke (0,60 do 0,85). Statistično značilne so bile tudi korelacije med zimskim indeksom severno atlantskega nihanja in povprečno temperaturo zraza od decembra do marca ter nastopom pomladanskih fenofaz, na čas pojava večine fenofaz v obravnavanih letih količina padavin ni imela značilnega vpliva. Spodnjo temperaturo praga za izračun termalnega časa smo določili s statistično metodo najmanjšega standardnega odklona temperaturnih vsot; variabilnost izračunanih vsot med leti je bila velika (10% do 30%). Uporaba fototermalnega časa za Ljubljano je značilno izboljšala delež pojasnjene variabilnosti v primerjavi s termalnim časom. Z metodo multiple linearne regresije smo oblikovali *fenološke* in *fenoklimatske* modele za napoved nastopa fenofaz. Izmed obravnavanih rastlin so bili najboljši fenološki indikatorji breza, regrat ter divji kostanj. S *fenološkimi* modeli smo lahko pojasnili med 50% in 79%, s *fenoklimatskimi* pa v povprečju 86% variabilnosti. V *fenoklimatskih* modelih so bile največkrat vključene meteorološke pojasnjevalne spremenljivke termalni čas, povprečne mesečne temperature ter za Ljubljano v vseh primerih fototermalni čas. Izdelane modele smo preverili z metodo navzkrižnega preverjanja, modelne napovedi so bile dokaj natančne in možne za najmanj pet dni vnaprej.

Ključne besede: Rastlinska fenologija, meteorološke spremenljivke, statistični modeli, Slovenija

¹ asist., dr., Biotehniška fakulteta, p.p. 2995, 1001 Ljubljana, zalika.crepinsek@bf.uni-lj.si

² prof., dr., Biotehniška fakulteta, p.p. 2995, 1001 Ljubljana, lucka.kajfez.bogataj@bf.uni-lj.si

ABSTRACT

MODELLING OF PLANT PHENOLOGICAL DEVELOPMENT

Possibilities of predicting phenological development of wild vegetation and cultivated plants were studied, based on meteorological parameters in Slovenia for the period 1955-2000. Correlation analysis and linear multiple regression were used to establish the relationship among phenological development and meteorological parameters. Correlation coefficients between the starting dates of phenological phases with the air temperature of the previous 2-3 months were relatively high (0.6 to 0.85). North Atlantic Oscillation Index was also statistically significant correlated with average air temperatures from December to March and spring phenophases appearance; however the amount of monthly precipitation in actual conditions was not significantly correlated to mostly of discussing phenophases. Lower threshold temperatures were determined with the least standard deviation of growing degree-days. Variability of calculated heat sums among years was relatively high (10% to 30%). The inclusion of photothermal time for location Ljubljana significant improved the models. With linear multiple regression we formed *phenological* and *phenoclimatic* models. The most frequently included independent variables of *phenological* models were birch, dandelion and horse chestnut, we can state that they were phenological indicators in given conditions. We could explain from 50% to 79% of variability with *phenological* models, respectively 86% on average with *phenoclimatic* models. Thermal time, mean monthly temperatures and photothermal time for Ljubljana were most frequently included variables in *phenoclimatic* models. We tested models with cross validation method; predictions were quite accurate with at least 5 days foresight period.

Key words: Plant phenology, Meteorological variables, Statistical models, Slovenia

1 UVOD

Fenologija je veda, ki proučuje periodične biološke faze in vzroke njihovega pojava ob upoštevanju živih in neživih dejavnikov okolja (Lieth, 1997). Zgodnja napoved nastopa fenoloških faz je pomembna na številnih področjih človekovih dejavnosti, še posebej pa v kmetijstvu (Črepinšek, 2002). Fenološke podatke uporabljamo pri izdelavi agrometeoroloških analiz, ki nam pomagajo pri pripravi agrometeoroloških napovedi, pri načrtovanju kmetijske proizvodnje z vidika toplotnih zahtev rastlin, pri načrtovanju agrotehničnih ukrepov kot so setev, namakanje, rez, varstvo rastlin ali spravilo pridelka. Vse bolj pomembna je uporaba fenologije na področju alergij v medicinski meteorologiji ter pri modeliranju rasti in razvoja rastlinske odeje. Evropska okoljska agencija je med različne kazalce globalnih sprememb podnebja predlagala tudi fenološke faze (Menzel, 2003).

Pojav določene fenološke faze je tesno povezan z različnimi podnebnimi dejavniki kot so temperatura zraka, temperatura tal, količina padavin, sončno obsevanje, evapotranspiracija, dolžina dneva, trajanje snežne odeje (Wielgolaski, 2001). Na območjih zmernih in severnih geografskih širin, kjer imajo rastline aktivno obdobje rasti v pomladansko-poletnem času ter zimsko mirovanje, je fenološki razvoj najbolj odvisen od temperature in dolžine dneva (Chmielewski in sod., 2004). Številne raziskave so pokazale, da lahko variabilnost v času nastopa fenofaz med leti v veliki meri pojasnimo s termalnim časom, to so akumulirane toplotne enote tekom razvoja rastline (Schaber in Badeck, 2003). Literatura navaja tudi nekaj modelov, ki poskušajo fenološki razvoj pojasniti s fototermalnim časom (Masle in sod., 1989; Huang in sod.,

2001), vendar pa sama dolžina dneva brez interakcije temperature zraka ne more pojasniti variabilnosti med leti, saj je dolžina dne za posamezen dan v letu na določeni postaji konstanta.

Spremenljivost podnebja v makro skali močno vpliva na povprečne klimatske razmere in tako tudi na fenologijo rastlin. Severno atlantsko nihanje (NAO) je meridionalno nihanje atmosferskih mas med Islandijo in Azori, povezano z intenzivnim transportom toplih in vlažnih zračnih mas iznad Atlantika proti Evropi. Z njim lahko pojasnimo velik del spremenljivosti temperatur zimskih mesecev na širšem atlantskem področju (Hurrell in Loon, 1997). Indeks severno atlantskega nihanja (NAOI) je definiran kot razlika med standardiziranimi zračnima pritiskoma med centroma visokega in nizkega zračnega pritiska, zime s pozitivnimi vrednostmi NAOI se odražajo v toplih in vlažnih zimah v severni in srednji Evropi (Hurrell, 1996). Za mnoga področja so že ugotovili značilno povezanost med NAOI ter nastopi fenoloških faz (Menzel, 2003), med drugim tudi za področje osrednje Italije (Piovesan in Schirone, 2000) in Slovenije (Skaar, 1999; Črepinšek in sod., 2002).

Z razvojem računalništva v zadnjih desetletjih se je povečalo število raziskav na področju agrometeoroloških modelov. Modeliranje je način kvantificiranja odnosov med biološkimi procesi (vključujoč tudi fenološke) in dejavniki okolja ali med različnimi biološkimi procesi z namenom bolj natančnega opisa, razumevanja in napovedovanja le-teh glede na pogonske spremenljivke (Scharrer in Schmidt, 1998). Pri fenološkem modeliranju običajno tvorimo prognostične modele za napoved nastopa posameznih fenofaz, modele pa delimo v statistične in dinamične. Slednji temeljijo na vzročnih povezavah med biološkimi procesi in pogonskimi spremenljivkami, so vsestransko uporabni in jih je možno nadgrajevati, vendar pa so navadno dinamični modeli precej zapleteni in zahtevajo veliko število vhodnih parametrov. Statistični modeli temeljijo na dolgoletnih zaporednih opazovanjih parametrov okolja ter pojavov fenofaz na isti postaji. Metodologija zanje temelji na analizi korelacijskih koeficientov med proučevanimi spremenljivkami ter uporabi različnih regresijskih tehnik. Na osnovi korelacijskih koeficientov poiščemo tiste zveze med fenofazami (odvisna spremenljivka) ter neodvisnimi spremenljivkami, pri katerih se pojavljajo statistično značilne povezave in nato oblikujemo enostavne ali multiple regresijske enačbe.

Glede na vhodne podatke ločimo enostavne *fenološke* modele ter kombinirane *fenoklimatske* modele (Cenci in Ceschia, 2000). Pri enostavnih *fenoloških* modelih uporabimo za napovedovanje pojava fenofaze izbrane rastline predhodne fenofaze iste rastline ali predhodne fenofaze drugih rastlin, katerih razvoj je v korelaciji z izbrano rastlino (Črepinšek, 2002; Kajfež-Bogataj in Bergant, 1998). Na osnovi dolgoletnega niza podatkov torej določimo fenološke indikatorje, to je rastline, s katerimi lahko najuspešnejše napovedujemo razvoj ostalih, pogost primer je uporaba fenoloških podatkov samoniklih rastlin za napoved fenofaz gojenih rastlin (Bergant in sod., 2002; Kott in Valter, 2000). Večinoma pa pri modeliranju fenologije vključimo v model poleg fenoloških tudi druge spremenljivke, ki vplivajo na fenološki razvoj ali so z njim v korelaciji, največkrat meteorološke elemente okolja. Takšne modele imenujemo kombinirane ali mešane *fenoklimatske* modele (Baumgärtner in sod., 1998).

Cilj naše raziskave je izdelava statističnih modelov za napoved fenofaz olistanja in cvetenja za različne gojene in negojene rastline na osnovi meteoroloških in fenoloških

podatkov. Kvantificiranje odnosov med fenološkimi fazami različnih vrst rastlin ter agrometeorološkimi dejavniki na klimatsko različnih področjih bo pripomoglo k opredelitvi kritičnih spremenljivk, ki najbolj vplivajo na variabilnost fenološkega razvoja v Sloveniji.

2 MATERIAL IN METODE

Uporabili smo fenološke podatke gojenih in samoniklih rastlin za osem postaj v Sloveniji za obdobje 1955-2000, fenološki arhiv pa je last Agencije republike Slovenije za okolje (ARSO). Vsi meteorološki podatki, razen indeksa severno atlantskega nihanja (NAOI) so prav tako iz arhiva ARSO, pri čemer izbrane postaje predstavljajo hkrati fenološko in meteorološko postajo.

2.1 Fenološki podatki

V raziskavo smo vključili 6 različnih fenofaz oziroma 17 rastlin (pregl. 1), ki sodijo v naslednje skupine: negojene zelne rastline (ivanjščica, mali zvonček, regrat, pomladanski žafran), gozdno drevje in grmičevje (breza, bukev, črni bezeg, divji kostanj, iva, leska, lipa, robinija, smreka, španski bezeg), trave (pasja trava) in sadno drevje (češplja, jablana). Logično kontrolo fenoloških podatkov je izvedel ARSO, za analizo pa smo vzeli samo popolne nize podatkov brez interpoliranih vrednosti. Kritično kontrolo smo izvedli s standardnimi statističnimi analizami oziroma izračunom deskriptivnih statistik. Fenološke podatke izbranih rastlin smo uporabili za izračun štirih fenoloških indeksov: indeksa olistanja (dolgoletno povprečje nastopa olistanja za bukev, brezo, lipo in divji kostanj), zgodnje-pomladanskega indeksa cvetenja (dolgoletno povprečje nastopa cvetenja za brezo, regrat, ivo, lesko in mali zvonček), pozno-pomladanskega indeksa cvetenja (dolgoletno povprečje nastopa cvetenja za robinijo, črni bezeg, španski bezeg in lipo) in indeksa začetka rastne sezone (povprečna vrednost zgoraj opisanih treh indeksov za enajst rastlin in osem postaj).

2.2 Meteorološki podatki

Obravnavane postaje (pregl. 1) so razporejene po klimatsko različnih predelih Slovenije. Klimatski podatki za posamezne postaje kažejo na veliko raznolikost podnebja med posameznimi obravnavanimi postajami. Vključeni so kraji s celinskim podnebjem kot npr. Murska Sobota s povprečno letno temperaturo zraka 9,2°C in letno količino padavin okrog 800 mm, kot tudi kraji z višjo nadmorsko višino in alpskim podnebjem – Rateče s povprečno letno temperaturo zraka 5,7°C in letno količino padavin okrog 1600 mm. Uporabili smo podatke iz arhiva ARSO za dnevne minimalne, povprečne in maksimalne temperature, povprečne mesečne temperature ter mesečne količine padavin. Poleg omenjenih meteoroloških podatkov smo kot spremenljivke v modele vključili tudi mesečne, sezonske in letne vrednosti NAOI, vir: <http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/Data/naodjfmindex.1864-2004.xls>, (Jones in sod., 1997).

Preglednica 1: Fenološki podatki: rastline, fenofaze, postaje.
Table 1: Phenological data: plants, phenophases, locations.

<i>rastlina</i>		<i>fenofaze,</i>
<i>slovensko ime</i>	<i>latinsko ime</i>	<i>izbrane za analize</i>
- jablana	<i>Malus domestica</i> Borkh	LU, F1, F2, FR, M
- bukev	<i>Fagus sylvatica</i> L.	LU, LC
- robinija	<i>Robinia pseudacacia</i> L.	F2
- pasja trava	<i>Dactylis glomerata</i> L.	F1
- črni bezeg	<i>Sambucus nigra</i> L.	F2
- španski bezeg	<i>Syringa vulgaris</i> L.	F2
- breza	<i>Betula pendula</i> Roth.	LU, F1, LC
- regrat	<i>Taraxacum officinale</i> Weber/Wiggers	F1
- iva	<i>Salix caprea</i> L.	F1
- leska	<i>Corylus avellana</i> L.	F1
- divji kostanj	<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	LU, F1
- lipa	<i>Tilia platyphyllos</i> Scop.	LU, F1, LC
- smreka	<i>Picea abies</i> (L.) Karsten	LU
- ivanjščica	<i>Leucanthemum irtutianum</i> Turcz.	F1
- češplja	<i>Prunus domestica</i> L.	LU, F1, F2, FR, M
- zvonček	<i>Galanthus nivalis</i> L.	F1
- žafran	<i>Crocus napolitanus</i> Mordant&Loisel.	F1

fenofaze:

- olistanje, prvi poganjki (LU)
- začetek cvetenja (F1)
- polno cvetenje (F2)
- prvi zreli plodovi (FR)
- zrelost (M)
- jesensko barvanje listja (LC)

postaje (so hkrati meteorološke in fenološke postaje)

postaja	geografske koordinate	nadmorska višina
- Celje	46°15'N, 15°15'E	242 m
- Ilirska Bistrica	45°34'N, 14°15'E	414 m
- Lesce	46°22'N, 14°11'E	515 m
- Ljubljana	46°04'N, 14°31'E	299 m
- Maribor	46°32'N, 15°39'E	275 m
- Murska Sobota	46°39'N, 15°12'E	190 m
- Novo mesto	45°48'N, 15°11'E	220 m
- Rateče	46°30'N, 13°43'E	864 m

2.3 Metode

2.3.1 Statistični modeli

Za opis odvisnosti nastopa določene fenofaze od meteoroloških in fenoloških spremenljivk smo uporabili multiplo linearno regresijo (Wilks, 1995; von Storch in Zwiers, 1999). Izdelali smo modele za napoved začetka cvetenja jablane, češplje, regrata, pasje trave, breze in lipe, polnega cvetenja jablane, češplje, leske, robinije in črnega bezga ter olistanja bukvje, breze in lipe. Regresija je statistična metoda, s katero empiričnim podatkom prilagodimo ustrezno funkcijo oziroma matematični model. Namen regresije je proučevanje odvisnosti ene spremenljivke od drugih spremenljivk z namenom novih spoznanj in napovedovanje vrednosti ene spremenljivke na osnovi znanih vrednosti drugih spremenljivk. Odvisno spremenljivko smo označili z Y (npr. nastop fenofaze cvetenja), neodvisne ali pojasnjevalne spremenljivke pa z X_1, X_2, \dots, X_n (npr. temperatura zraka, količina padavin, NAOI). Odvisnost pomeni, da vrednost ene spremenljivke vpliva na vrednost druge spremenljivke, ne pa tudi obratno. Linearno multiplo regresijsko odvisnost smo zapisali kot:

$$Y = a + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (1)$$

pri čemer so $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ parametri regresijskega modela, ki podajajo parcialno odvisnost Y od X_n pri upoštevanju soodvisnosti ostalih neodvisnih spremenljivk v modelu; ε so naključni vplivi, medsebojno neodvisni. Uporabili smo metodo regresije po korakih, začeli smo z najenostavnejšim modelom, vsakokrat dodali nov linearen člen in analizirali nov model glede na predhodnega. Ker smo pri izdelavi regresijskih modelov razpolagali z različnim številom spremenljivk (fenofaz) za posamezne postaje, smo delež pojasnjene variabilnosti izrazili s prilagojenim koeficientom determinacije (R^2), ki nam omogoča realno primerjavo takih modelov. Izbrane modele smo preverili z metodo navzkrižnega preverjanja.

2.3.2 Določitev parametrov modela

Temperaturne vsote

Kot mero za energijo, ki je potrebna za razvoj rastline do določene fenofaze, uporabljamo temperaturne vsote (angl. *growing degree days*) – (GDD) ali z drugim izrazom tudi termalni čas. Modeli za izračun temperaturnih vsot predpostavljajo linearno odvisnost med temperaturo zraka in stopnjo razvoja, pri čemer upoštevajo samo temperature nad mejno vrednostjo – to je temperaturo praga (T_b) (McMaster in Wilhelm, 1997), pod katero se stopnja razvoja ustavi ali zelo upočasni. Temperaturne vsote smo izrazili v enotah stopinjski dnevi ($^{\circ}D$), kjer $1^{\circ}D$ pomeni $1^{\circ}C$ nad T_b v času 24 h (Snyder in sod., 1999). GDD so izračunane po metodi McMaster in Wilhelm (1997) kot:

$$GDD = \sum \left((T_{i,max} + T_{i,min}) \times 0.5 - T_b \right) \quad (2)$$

kjer sta $T_{i,max}$ in $T_{i,min}$ maksimalna in minimalna dnevna temperatura zraka, T_b je spodnja temperatura praga, izračunana statistično za vsako posamezno rastlino in postajo posebej. Kadar je $\left[(T_{i,max} + T_{i,min}) \times 0.5 \right] < T_b$, potem velja $\left[(T_{i,max} + T_{i,min}) \times 0.5 \right] = T_b$. Odštevanje T_b sledi torej že po izračunu povprečne dnevne temperature (T_{avg}) na osnovi $T_{i,max}$ in $T_{i,min}$. Poleg zgoraj omenjene metode za izračun temperaturnih vsot smo uporabili še dve dodatni metodi: 1. GDD smo računali kot razliko med T_{avg} in enotno temperaturo praga $T_b=0^{\circ}C$, 2. GDD smo računali kot razliko med $T_{i,min}$ in $T_b=0^{\circ}C$. Kot začetni datum za seštevanje temperaturnih vsot smo upoštevali 1.januar, ki se v fenoloških študijah pogosto uporablja, ker je določitev začetnega datuma na fiziološki osnovi zelo zahtevna in dolgotrajna (Spano in sod., 1999).

Temperatura praga

Izbira prave T_b je bistvenega pomena za izračun GDD. Za izračun T_b za določeno fenofazo na izbrani postaji smo izračunali niz možnih T_b (od $-5^{\circ}C$ do $10^{\circ}C$ s korakom $1^{\circ}C$) z metodo najmanjšega standardnega odklona GDD (Yang in sod., 1995). Standardni odklon povprečne GDD (SD_{GDD}) za različne T_b smo izračunali kot:

$$SD_{GDD} = \sqrt{\frac{\sum GDD_i - GDD_{mean}}{n-1}} \quad (3)$$

GDD_i je GDD za i -to opazovanje, GDD_{mean} je povprečna GDD za celotno obdobje in n število podatkov, v našem primeru let. Po tej metodi smo izračunali GDD z uporabo niza različnih možnih T_b , pri čemer smo pri vsakem izračunu dobili set GDD in njenega standardnega odklona. Temperatura, pri kateri je bila SD_{GDD} najmanjša, je bila statistično določena najprimernejša T_b , postopek smo ponovili za vsako fenofazo in vsako postajo.

Fototermalni čas

Obstajajo številne modifikacije en. 2 z namenom, da bi povečali biološki pomen termalnega časa, med drugim tudi pretvorba GDD v fototermalni čas oziroma upoštevanje dolžine dneva

kot dodatne spremenljivke v enačbi. Fototermalni čas (PT) smo izračunali po enačbi, uporabljeni v raziskavi Masle in sod. (1989) kot:

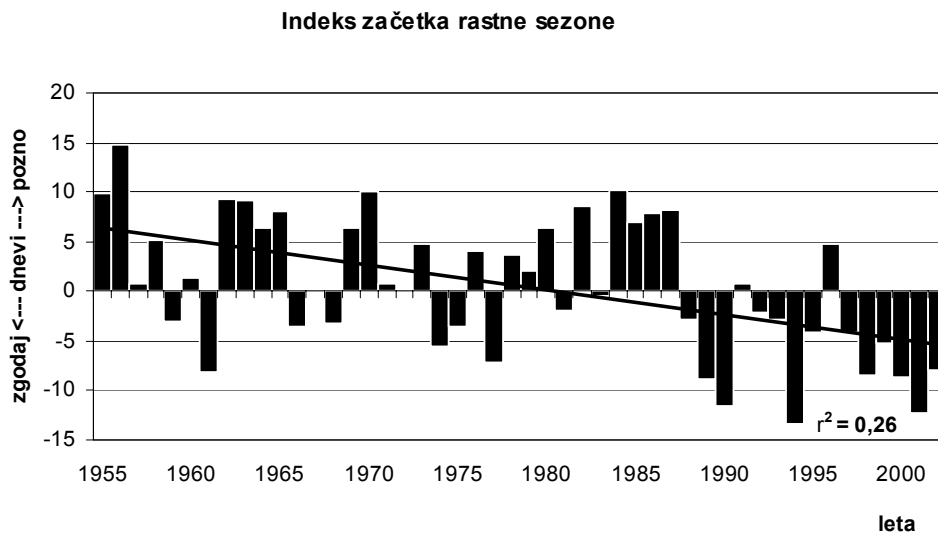
$$PT = \sum l_i \cdot (T_{l,i} - T_b) \quad (4)$$

kjer je l dolžina svetlega dela dneva (upoštevali smo čas od sončnega vzhoda do zahoda), T_l je povprečna temperatura za ta čas in T_b je temperatura praga. T_l smo računali kot $T_l = T_{\min} + k \cdot (T_{\max} - T_{\min})$, pri čemer je parameter k določen empirično s pomočjo fizikalnega modela (Masle in sod., 1989) in znaša 0,65. Za izračun dolžine dneva smo uporabili metodo po Fernhoutu in Kurtzu (2001).

3 REZULTATI

3.1 Osnovne opisne statistike in trendi

Pred uporabo fenoloških podatkov za izdelavo regresijskih modelov smo naredili njihovo osnovno analizo, s katero smo dobili predstavo o časovni in prostorski spremenljivosti ter o ekstremnih ali neobičajnih vrednostih podatkov. Variacijski razpon (VR) med najzgodnejšim in najkasnejšim dnevom nastopa fenofaze za olistanje breze, bukve, divjega kostanja, lipe in smreke je znašal v povprečju 29 do 39 dni. Podobne vrednosti so veljale za jesensko rumenenje listja breze, bukve in lipe (33 do 40 dni). Za začetek cvetenja pri zgodaj cvetočih rastlinah je bila značilna izredno velika variabilnost med leti – pri žafranu je znašal povprečen VR 50 dni, pri ivi in zvončku 60 oziroma 61 dni, za lesko celo 80 dni. Pri ostalih rastlinah, ki zacvetijo kasno pomladi, je bil VR istega velikostnega reda kot pri rumenenju listja jeseni in je znašal v povprečju med 30 in 40 dni.



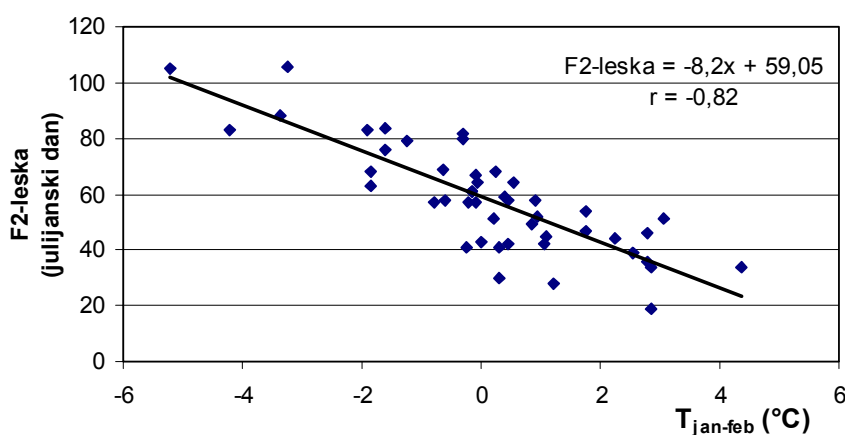
Slika 1: Indeks začetka rastne sezone z odkloni od dolgoletnega povprečja (stolpci) kaže na okrog 10-dnevni zgodnejši začetek rastne sezone (linija prikazuje linearni trend) v Sloveniji v obdobju 1955-2000.

Figure 1: Growing season index with deviations from the long-term means (vertical bars) shows approximately 10-days shift to an earlier beginning of growing season in Slovenia for the period 1955-2000.

Osnovno dolgoletno tendenco razvoja obravnavanih fenofaz za obdobje 1955-2000 smo opisali z linearnim regresijskim modelom, ki se je najbolje prilegal našim podatkom. Statistično značilni linearni trendi so pokazali, da se približno polovico pomladanskih in poletnih fenofaz pojavlja zadnja leta bolj zgodaj. Povprečni linearni trend je znašal (dnevi/dekado) $-1,4$ dneva za olistanje, $-2,2$ za kasno pomladansko cvetenje in $-3,1$ za zgodnje pomladansko cvetenje, kar pomeni v povprečju okrog 6 dni zgodnejše olistanje in 10-14 dni zgodnejše cvetenje glede na začetno obdobje. Začetek rastne sezone je v zadnji dekadi okrog 10 dni zgodnejši, trend indeksa začetka rastne sezone, ki znaša $-2,2$ dni/dekado, smo prikazali na sl. 1.

3.2 Korelacije s temperaturami zraka ter indeksom severno atlantskega nihanja

Povezanost med fenološkim razvojem in meteorološkimi spremenljivkami smo proučevali s korelacijsko analizo. Mesečne temperature zraka so vplivale močneje na fenofaze cvetenja (korelacijski koeficient (r) od $-0,6$ do $-0,85$) kot na olistanje. Ta ista povezanost je bila šibkejša in pozitivna za jesenske fenofaze, kar pomeni zakasnitev konca rastne sezone ob višjih temperaturah zraka. V večini primerov pomeni 1°C višja povprečna mesečna ali dvomesečna temperatura od 3 do 5 dni zgodnejše cvetenje oziroma olistanje. Največjo odvisnost začetka cvetenja od temperature smo ugotovili pri leski, kjer je sprememba povprečne temperature zraka za januar in februar za 1°C pomenila skoraj 8 dni razlike v nastopu fenofaze cvetenja (sl. 2). Povezanost med cvetenjem jablane in češplje ter temperaturami zraka je bila največja za obdobje februar-marec, sprememba pa je znašala 4-6 dni za vsako $^{\circ}\text{C}$. Rezultati se ujemajo z izsledki številnih dugih raziskav za gojene in negojene rastline (Menzel, 2003; Chmielewski in sod., 2004).

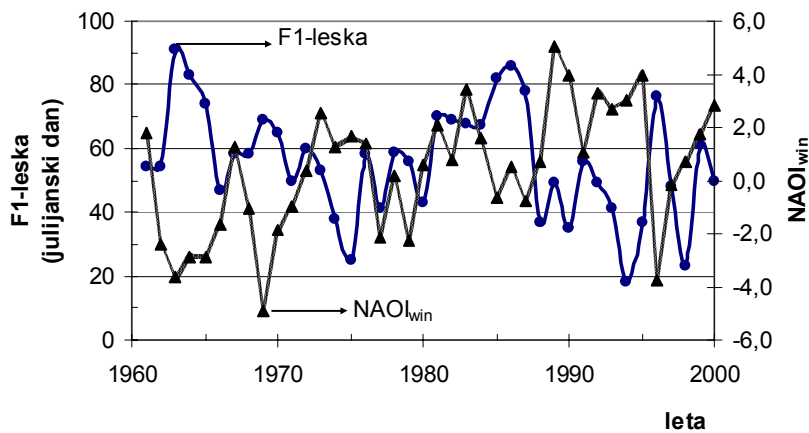


Slika 2: Povezanost med polnim cvetenjem leske (F2-leska) in povprečno temperaturo zraka januar-februar v Mariboru, 1955-2000; $r=-0,82$ ($p<0,001$ ***).

Figure 2: Correlation between full flowering of hazel (F2-leska) and the average temperature January-February in Maribor, 1955-2000; $r=-0.82$ ($p<0.001$ ***).

Analizirali smo tudi povezanost nastopa pomladanskih fenofaz in NAO. Korelacijska analiza med zimskim indeksom NAO (NAOI_{win}) in temperaturo zraka je bila statistično značilna za vse postaje v obdobju december-marec, povprečen r je znašal $+0,58$. Leta z

velikimi vrednostmi $NAOI_{win}$ so se odražala v zgodnejšem fenološkem razvoju (sl. 3), pri čemer je bila povezanost največja pri najzgodnejših fenofazah. Za kasnejše fenofaze, ki nastopijo poleti ali jeseni, so bile povezave šibkejše ali jih sploh ni bilo.



Slika 3: Obratna sorazmernost hodov začetka cvetenja leske (F1-leska, julijanski dan) in $NAOI_{win}$ v Ljubljani, 1961-2000, $r = -0,49$ ($p < 0,05^{**}$).

Figure 3: Inversely-proportionality of curves of first pollen spread of hazel (F1-leska, day of the year) and $NAOI_{win}$ in Ljubljana, 1961-2000, $r = -0.49$ ($p < 0.05^{**}$).

3.3 Določitev temperature praga

Temperaturo spodnjega praga (T_b) smo določili z metodo najmanjšega standardnega odklona GDD (en. 3). Za rastline, pri katerih nastopi cvetenje relativno zgodaj pomladi oziroma še v času koledarske zime (leska, iva, mali zvonček, pomladanski žafran), je bila večina izračunanih T_b negativnih. Najnižjo T_b smo izračunali za cvetenje leske (povprečje na vseh postajah približno -3°C), za ostale rastline so bile T_b med -3°C in $+2^{\circ}\text{C}$. Naši izračuni se ujemajo z ugotovitvami drugih raziskav (Larcher, 1995; Snyder in sod., 1999). Tako je Wielgolaski (1999) določil T_b za cvetenje leske $-2,6^{\circ}\text{C}$, ive $-4,5^{\circ}\text{C}$ in čremse $-5,9^{\circ}\text{C}$. Za olistanje breze, bukve in lipe smo izračunali T_b med $+3^{\circ}\text{C}$ in $+4^{\circ}\text{C}$. Za kasnejše fenofaze (cvetenje v obdobju maj-junij) so bile T_b nekoliko višje, v povprečju med 5°C in 7°C . Izračunane T_b za določeno rastlino so se med posameznimi postajami razlikovale, kot primer so v pregl. 2 prikazani izračuni za olistanje lipe.

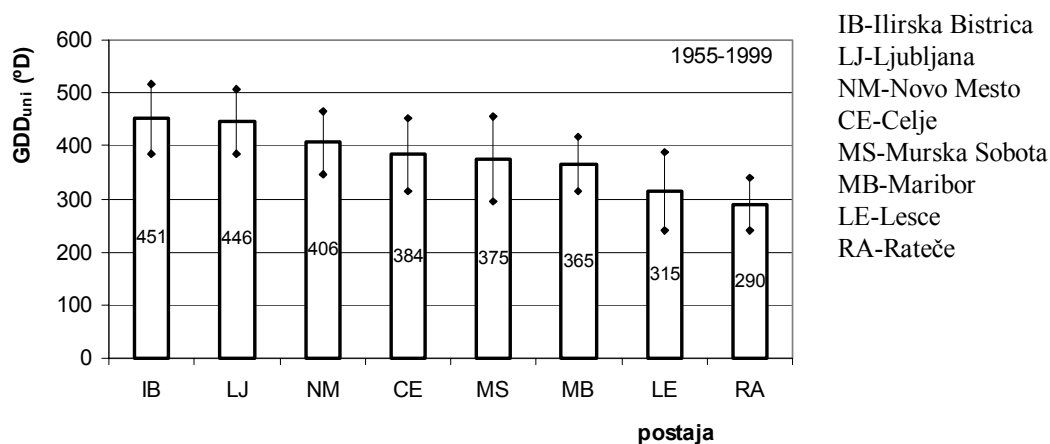
Preglednica 2: Povprečne temperaturne vsote (GDD_{stat}) nad statistično določeno T_b , potrebne za olistanje lipe ter koeficient variabilnosti za obdobje 1955-1999.

Table 2: Average growing degree days (GDD_{stat}) above the statistical selected T_b , required for leaf unfolding of large-leaved lime and the coefficient of variation for the period 1955-1999.

postaja	statistično določena T_b ($^{\circ}C$)	povprečna GDD_{stat}	koeficient variabilnosti (%) C_v
Celje	3	241	15
Ilirska Bistrica	2	321	12
Lesce	5	102	11
Ljubljana	3	258	11
Maribor	3	251	19
Murska Sobota	3	234	11
Novo mesto	3	254	21
Rateče	5	74	14

3.4 Izračun temperaturnih vsot ter fotothermalnega časa

Temperaturne vsote smo izračunali na dva načina, najprej z uporabo en. 2 na osnovi statistično določene T_b (GDD_{stat}) in dodatno z izračunom nad konstantno $T_b=0^{\circ}C$ (GDD_{uni}). Izračunane najmanjše GDD_{uni} so bile v Ratečah, največje pa v večini primerov v Ilirski Bistrici in Ljubljani (sl. 4), kar potrjuje raziskave, v katerih so dokazali, da iste vrste rastlin v toplejših področjih potrebujejo za svoj razvoj večjo vsoto toplotnih enot kot v hladnejših predelih (Perry in sod., 1986).



Slika 4: Povprečne temperaturne vsote nad $T_b=0^{\circ}C$ (GDD_{uni} v D°), potrebne za olistanje breze

Figure 4: Average growing degree-days above $T_b=0^{\circ}C$ (GDD_{uni} in D°), required for birch unfolding

Koeficient variabilnosti (C_v) izračunanih GDD_{uni} med leti je bil relativno velik (10% do 25%), večji za zgodnejše fenofaze. Povprečen r med GDD_{uni} in dnevom pojava fenofaze je bil relativno nizek ($<0,5$). Tudi pri uporabi GDD_{stat} , ki smo jih izračunali na osnovi statistično določenih T_b za vsako posamezno fenofazo in postajo, je bila variabilnost velika; C_v je znašal 12% do 30%. Če smo uporabili GDD_{stat} namesto GDD_{uni} , je bil r nekoliko višji (0,5-0,65). Samo za postajo Ljubljana smo poleg GDD izračunali tudi PT , pri čemer smo upoštevali samo temperaturo zraka za svetli del

dneva (en. 4). Za vse obravnavane fenofaze v Ljubljani je bil r višji, kadar smo namesto GDD uporabili PT oziroma se je C_v zmanjšal na 8% v primerjavi s 14%.

3.5 Modeli za napoved pojava fenofaz

Z uporabo multiple regresijske analize smo tvorili *fenološke* in *fenoklimatske* modele za 10 različnih rastlin oziroma 14 fenofaz, pri katerih lahko napovedi uporabimo na področju agrometeorologije (cvetenje jablane, češplje, regrata), medicinske meteorologije (cvetenje leske, pasje trave, breze), zdravilnih rastlin (cvetenje lipe, črnega bezga, robinije) ter raziskav podnebnih sprememb (olistanje breze, bukve, lipe).

Preglednica 3: Parametri multiple linearne regresije za napoved začetka cvetenja regrata in češplje na osnovi fenoloških podatkov negojenih rastlin; F1-začetek cvetenja, F2-polno cvetenje, LU-olistanje.

Table 3: Multiple linear regression statistics for predicting the beginning of flowering of dandelion and plum tree, plotted against previous phenological data of wild species; F1-beginning of flowering, F2-full flowering, LU-first leaf unfolding.

$F1_{dandelion}$	pojasnjevalne spremenljivke modela (X_1, X_2, \dots, X_n) (fenološke faze)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti (b_1, b_2, \dots, b_n)	R^2
Celje	$F1_{snowdrop}; F1_{willow}$	63,4	0,16; 0,40	0,72
Ilirska Bistrica	$F1_{willow}$	47,3	0,65	0,50
Lesce	$F1_{snowdrop}; F1_{s.saffron}$	70,7	0,30; 0,20	0,53
Maribor	$F1_{snowdrop}; F1_{willow}; F1_{birch}$	37,3	0,16; 0,19	0,73
Novo mesto	$F2_{hazel}; F1_{s.saffron}$	62,6	0,25; 0,29	0,54
$F1_{plum}$	pojasnjevalne spremenljivke modela (X_1, X_2, \dots, X_n) (fenološke faze)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti (b_1, b_2, \dots, b_n)	R^2
Celje	$F1_{dandelion}$	-6,4	1,1	0,72
Ilirska Bistrica	$LU_{birch}; LU_{h.chestnut};$ $F1_{dandelion}$	4,5	0,37; 0,34; 0,33	0,84
Lesce	$LU_{linden}; F1_{s.saffron};$ $F1_{dandelion}$	34,6	0,40; 0,23; 0,16	0,72
Maribor	$LU_{birch}; F1_{dandelion}$	15,8	0,56; 0,37	0,80
Murska Sobota	$LU_{h.chestnut}; F1_{birch}; F2_{hazel}$	0,66	0,50; 0,45; 0,16	0,84
Novo mesto	$LU_{birch}; F2_{hazel}$	18,0	0,77; 0,15	0,76
Rateče	$F1_{h.chestnut}; F1_{dandelion};$ $F1_{willow}$	-7,2	0,90; 0,35; 0,15	0,87

S posameznim *fenološkim* modelom smo napovedali čas pojava fenofaze za določeno rastlino na osnovi fenoloških podatkov iste rastline ali fenoloških podatkov druge

rastline, med katerima obstaja korelacija v fenološkem razvoju. Z vidika uporabnosti smo šteli za primerne samo modele, ki so zagotavljali napovedi vsaj 5 dni vnaprej. Zaradi velikega števila izdelanih modelov bomo v članku predstavili samo dva izmed njih. Kot primer *fenoloških* modelov (pojasnjevalne spremenljivke modela so izključno fenološki podatki) so v pregl. 3 prikazani modeli za napoved začetka cvetenja regrata in češplje, predstavljeni so samo modeli, s katerimi smo lahko pojasnili več kot polovico variabilnosti ($R^2 > 0,5$). Kot neodvisne spremenljivke v modelih so bile vključene fenofaze osmih rastlin (breza, divji kostanj, iva, leska, lipa, regrat, zvonček in žafran), pri čemer je največji R^2 znašal 0,87 pri modelu za napoved začetka cvetenje češplje v Ratečah. Pred cvetenjem regrata se pojavi pet fenofaz, ki so bile vključene v naših modelih kot pojasnjevalne spremenljivke (cvetenje breze, leske, žafrana, zvončka in ive) in so pojasnile med 50% in 73% variabilnosti v času nastopa cvetenja regrata. V Ljubljani in Ratečah smo z modelom lahko pojasnili manj kot 50% variabilnosti.

V kombinirane *fenoklimatske* modele (pregl. 4) smo kot neodvisne spremenljivke vključili povprečne mesečne temperature zraka, dvo- in tro-mesečna povprečja temperature zraka, mesečno količino padavin, GDD_{uni} in GDD_{stat} , NAOI in samo za postajo Ljubljana PT. Pri *fenoklimatskih* modelih za napoved cvetenja češplje se je delež pojasnjene variabilnosti glede na *fenološke* modele (pregl. 3) povečal v vseh primerih, razen za Ilirsko Bistrico. Na vseh ostalih postajah je bila kot meteorološka spremenljivka vključena GDD, v petih modelih kot GDD_{uni} in v enem kot GDD_{stat} , mesečne temperature v treh modelih, $NAOI_{win}$ v enem, mesečna količina padavin pa v nobenem modelu ni pojasnila značilnega deleža variabilnosti. Vrednosti R^2 so znašale od 0,84 do 0,93, napovedi pa so bile možne najmanj 5 dni vnaprej. Podobno bi lahko interpretirali tudi modele za napovedovanje začetka cvetenja regrata (pregl. 4).

Korelacijski koeficienti med opazovanimi in napovedanimi datumi nastopa fenofaz, izračunani z metodo navzkrižnega preverjanja, so znašali v povprečju nad 0,90, kar kaže na to, da so modeli dobro opisali dejansko stanje. Analiza ostankov navzkrižnega preverjanja je pokazala, da so ostanki na vseh postajah večji v izrazito toplih ali hladnih letih. Povprečna absolutna napaka *fenoklimatskih* modelov od 3,4 do 7,6 dni, kakor tudi delež pojasnjene variance od 42% do 93%, sta bili podobni kot v številnih drugih fenoloških modelih (Snyder in sod., 1999; Rötzer in sod., 2004). Poleg metode navzkrižnega preverjanja (niz 1955-1999) smo za postajo Celje, za katero smo razpolagali s podatki za največ rastlin, preizkusili modele tudi na neodvisnem nizu podatkov za leto 2000. Opazovane vrednosti za leto 2000 smo primerjali z napovedanimi vrednostmi regresijskih modelov, izdelanimi na osnovi podatkov za obdobje 1955-1999 (pregl. 5), razlike med napovedmi in opazovanji so pokazale, da so bile tudi napovedi za to leto pri vseh modelih dobre. Maksimalna razlika je znašala 5 dni pri modelu za napoved cvetenja robinije, pri ostalih modelih so bile napovedi od štiri dni prezgodnje do štiri dni prekasne.

Preglednica 4: Parametri multiple linearne regresije za napoved začetka cvetenja češplje in regrata na osnovi fenoloških in meteoroloških podatkov; F1-začetek cvetenja, F2-polno cvetenje, LU-olistanje, $T_{\text{feb}}, T_{\text{mar}}, T_{\text{apr}}$ - povprečne mesečne temperature zraka za februar, marec in april, NAOI_{win} – zimski indeks severno atlantskega nihanja, GDD – temperaturene vsote, PT – fototermalni čas.

Table 4: Multiple linear regression statistics for predicting the beginning of flowering of plum tree and dandelion, plotted against phenological and meteorological data; F1- beginning of flowering, F2 - full flowering, LU - first leaf unfolding, $T_{\text{feb}}, T_{\text{mar}}, T_{\text{apr}}$ - average monthly air temperatures for February, March, April, NAOI_{win} - Winter North Atlantic Oscillation Index, GDD - growing degree days, PT - photothermal time.

$F1_{\text{plum}}$	pojasnjevalne spremenljivke modela (fenološke) (X_1, X_2, \dots, X_{n-1})	pojasnjevalne spremenljivke modela (meteorološke) (X_n, X_{n+1}, \dots, X_k)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti (b_1, b_2, \dots, b_k)	R^2
Celje	$F1_{\text{dandelion}} ; F2_{\text{hazel}}$	$\text{GDD}_{\text{uni}}, T_{\text{mar}}$	7,6	0,09; 0,71; 0,07; -1,54	0,88
Ilirska Bistrica	$LU_{\text{birch}} ; LU_{\text{h.chestnut}} ; F1_{\text{dandelion}}$		4,5	0,37; 0,34; 0,33	0,84
Lesce	$LU_{\text{linden}} ; F1_{\text{saffron}} ; F1_{\text{dandelion}}$	GDD_{uni}	0,37	0,43; 0,38; 0,16; 0,04	0,84
Maribor	$LU_{\text{birch}} ; F1_{\text{dandelion}}$	$\text{GDD}_{\text{uni}}, \text{NAOI}_{\text{win}}$	-9,7	0,57; 0,37; 0,69; 0,05	0,84
Murska Sobota	$LU_{\text{h.chestnut}} ; F1_{\text{birch}} ; F2_{\text{hazel}}$	GDD_{uni}	-16,6	0,43; 0,49; 0,19; 0,04	0,87
Novo mesto	$LU_{\text{birch}} ; F2_{\text{hazel}}$	$\text{GDD}_{\text{stat}}, T_{\text{mar}}$	23,3	0,52; 0,19; 0,02; -1,14	0,88
Rateče	$F1_{\text{h.chestnut}} ; F1_{\text{dandelion}}$	$\text{GDD}_{\text{uni}}, T_{\text{apr}}$	23,0	0,53; 0,29; 0,05; -1,91	0,93

$F1_{\text{dandelion}}$	pojasnjevalne spremenljivke modela (fenološke) (X_1, X_2, \dots, X_{n-1})	pojasnjevalne spremenljivke modela (meteorološke) (X_n, X_{n+1}, \dots, X_k)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti (b_1, b_2, \dots, b_k)	R^2
Celje	$F1_{\text{snowdrop}} ; F1_{\text{willow}}$	$\text{GDD}_{\text{uni}}, T_{\text{mar}}$	72,0	0,15; 0,26; 0,03; -1,83	0,83
Ilirska Bistrica	$F2_{\text{hazel}}$	$\text{GDD}_{\text{stat}}, T_{\text{feb}}, T_{\text{mar}}$	63,5	0,16; 0,07; -1,61; -3,22	0,89
Lesce		$T_{\text{feb}}, T_{\text{mar}}$	118,3	-1,67; -2,75	0,69
Ljubljana	$F1_{\text{willow}}$	$\text{GDD}_{\text{uni}}, T_{\text{feb}}, T_{\text{mar}}, \text{PT}$	65,1	0,17; -0,08; -0,8; -1,94; 0,24	0,92
Maribor	$F1_{\text{snowdrop}} ; F1_{\text{birch}} ; F1_{\text{willow}}$	$\text{GDD}_{\text{uni}}, T_{\text{mar}}$	23,3	0,15; 0,21; 0,35; 0,07; -1,17	0,84
Novo mesto	$F2_{\text{hazel}}$	$\text{GDD}_{\text{stat}}, T_{\text{feb}}, T_{\text{mar}}$	67,3	0,15; 0,06; -1,11; -2,68	0,86
Rateče		$\text{GDD}_{\text{uni}}, T_{\text{feb}}, T_{\text{mar}}$	95,5	0,16; -1,67; -3,07	0,72

Preglednica 5: Primerjava z modeli napovedanih ter opazovanih datumov pojava obravnavanih fenofaz v Celju na neodvisnem nizu podatkov za leto 2000.
Table 5: Comparison of calculated and observed values of phenophases dates in Celje based on independent data set for year 2000.

fenofaza	opazovanje (julijanski dan)	napoved (julijanski dan)	razlika (dnevi) (napoved - opazovanje)	povprečna absolutna napaka (dnevi)
<i>F1_{birch}</i>	99	96	-3	4
<i>LU_{birch}</i>	103	103	0	5
<i>LU_{beech}</i>	104	102	-2	7
<i>F1_{plum}</i>	101	98	-3	5
<i>F2_{plum}</i>	104	106	+2	6
<i>F1_{apple}</i>	110	114	+4	5
<i>F2_{apple}</i>	115	115	0	7
<i>F2_{hazel}</i>	49	51	+2	7
<i>F1_{linden}</i>	139	143	+4	6
<i>LU_{linden}</i>	108	106	-2	6
<i>F1_{cock'sfoot}</i>	128	128	0	7
<i>F1_{dandelion}</i>	94	92	-2	4
<i>F2_{b.locust}</i>	129	134	+5	4
<i>F2_{lilac}</i>	111	107	-4	5

4 RAZPRAVA

Časovna analiza pojavljanja pomladanskih fenoloških faz (olistanje in cvetenje) je pokazala veliko spremenljivost med posameznimi leti. Čas pojava najzgodnejših fenofaz kot sta cvetenje pri malem zvončku ali leski, kaže večja nihanja v primerjavi s fenofazami, ki nastopijo kasno pomladi ali poleti. Naši izsledki se ujemajo z rezultati ostalih fenoloških analiz za širše področje Evrope (Wielgolaski, 1999; Menzel, 2003; Rötzer in sod., 2004). Ker na pojav posameznih fenofaz bistveno vpliva temperatura (Chmielewski in sod., 2004), so lahko med razlogi za velike razlike v času fenofaz neenaka sezonska temperaturna nihanja. V naši raziskavi so bila največja nihanja v povprečni mesečni temperaturi zraka ugotovljena za mesec februar. Analizirali smo tudi razlike v trendih pojava fenofaz, najznačilnejše trende so pokazale najzgodnejše fenofaze kot so cvetenje leske, ive in zvončka, kar kaže na to, da te rastline reagirajo bolj izrazito na spremembe temperature v poznih zimskih in zgodnje pomladanskih dneh. Na spremembe so bolj občutljive fenofaze cvetenja kot olistanja. Velikostni red izračunanih sprememb je primerljiv z izsledki ostalih avtorjev, ki so delali analize za različna področja v Evropi in severni Ameriki (Menzel, 2003; Chmielewski in sod., 2004).

Korelacijska analiza je pokazala, da je temperatura zraka pri nas glavni dejavnik, ki določa čas pojavljanja zgodnje pomladanskih fenofaz. Korelacije so bile tesnejše, kadar smo računali s povprečji temperatur dveh ali treh zaporednih mesecev pred cvetenjem, metodo povprečij uporabljajo tudi številni drugi avtorji (Ahas in sod., 2000; Sparks in sod., 2000). Ugotovili smo, da so rastline na enako spremembo temperature reagirale različno, tako je za 1°C višja povprečna dvomesečna temperatura zraka pospešila

cvetenje leske za približno 8 dni, pri češplji le za 4 dni. Različen način odzivanja rastlin ali živali na iste spremembe v njihovem okolju lahko dolgoročno pomeni velike spremembe v biodiverziteti določenega področja (Kramer in sod., 2000). Poleg temperature zraka lahko vplivajo na fenologijo tudi ostali dejavniki podnebja kot so npr. količina in razporeditev padavin, temperatura tal, trajanje sončnega obsevanja (Wielgolaski, 1999). Na osnovi korelacijske analize med mesečnimi količinami padavin in nastopom izbranih fenofaz smo lahko zaključili, da pri nas v pomladanskem času količina rastlinam dostopne vode navadno ni problematična, v ekstremno suhih letih ali na izrazito suhih rastiščih pa bi lahko na fenološki razvoj značilno vplivala prav količina padavin.

Na zimske in zgodnje pomladanske temperature na širšem atlantskem področju vpliva gibanje zračnih mas, ki ga opišemo s severno atlantskim nihanjem (Hurrell, 1996), do določene mere se to gibanje odraža tudi v vremenskih situacijah v Sloveniji (Črepinsek in sod., 2002). Naši rezultati so pokazali statistično značilne povezave med NAOI in povprečno temperaturo zraka od decembra do marca ter nastopom spomladanskih fenofaz, pri čemer so bile tudi pri nas statistično značilnejše korelacije za najzgodnejše fenofaze (Črepinšek, 2002; Menzel, 2003).

Pri napovedovanju razvoja rastlin na osnovi temperature zraka je splošno razširjena metoda GDD, pri čemer je za izračun bistvena izbira pravilne T_b (Yang, 1995). V naši raziskavi smo T_b določili s statistično metodo najmanjšega standardnega odklona temperaturnih vsot, pri čemer so bile izračunane T_b za pojav najzgodnejših fenofaz negativne (-3°C do -1°C), za kasnejše fenofaze pa med 3°C in 7°C . Negativne T_b so za izračun GDD uporabili tudi ostali avtorji (Snyder in sod., 1999; Wielgolaski, 1999). Čeprav s stališča fenološkega modeliranja uporaba negativnih T_b ni sporna, se večkrat pojavlja vprašanje fiziološkega pomena tako nizkih T_b (Snyder in sod., 1999). Nekateri avtorji so zato v svojih fenoloških raziskavah dokazovali, da lahko tudi pri tako nizkih temperaturah v določenem delu dneva potekajo fiziološke aktivnosti, ki vplivajo na kasnejše procese v razvoju rastline (Wielgolaski, 1999).

T_b za posamezno rastlino se ne spreminja samo glede na lokacijo, pač pa pri isti vrsti ali celo kultivarju tudi tekom sezone in glede na starost rastline (Wielgolaski, 1999). Fenološke karakteristike posamezne rastlinske vrste so prilagojene na specifično geografsko območje. Tudi v naši raziskavi so se izračunane T_b med posameznimi postajami razlikovale, iz česar so sledile značilne razlike v GDD, potrebnih za nastop olistanja in cvetenja. V Ratečah in Lescah sta bili izračunani T_b za pojav olistanja lipe enaki (5°C), prav tako sta bili zelo podobni izračunani GDD, 74°D oziroma 102°D . Izračunane temperaturne vsote za ti dve postaji, ki imata značilno nižje povprečne letne temperature zraka kot ostale obravnavane postaje, so bile nižje kot na ostalih postajah. Naši rezultati so potrdili izsledke raziskav, v katerih so dokazali, da iste vrste rastlin v toplejših razmerah potrebujejo za svoj življenjski krog večjo vsoto toplotnih enot kot v hladnejših predelih (Perry in sod., 1986).

Glede na vhodne podatke smo modele za napoved nastopa fenoloških faz razdelili v čiste *fenološke* in mešane *fenoklimatske modele* (Cenci in Ceschia, 2000). *Fenološki* modeli temeljijo na korelacijah med časom pojava fenofaze, ki jo napovedujemo in časom pojava fenofaz ostalih rastlin na isti lokaciji. *Fenološke* modele smo tvorili z namenom, da določimo referenčne rastline, s pomočjo katerih bi lahko napovedovali

razvoj drugih rastlin. Te t.i. markerske rastline (Spano in sod., 1999) lahko uporabimo, kadar za določeno področje nimamo na voljo klimatskih podatkov. V naši raziskavi je približno dve tretjini vseh *fenoloških* modelov lahko pojasnilo več kot 50% variance samo s fenološkimi spremenljivkami. Gledano v celoti je bila najpogosteje vključena neodvisna spremenljivka v teh modelih breza, sledita regrat in divji kostanj. Za obravnavani niz podatkov so se izkazale te rastline kot dobri fenološki indikatorji. Najboljše rezultate smo dosegli za modele polnega cvetenja češplje in jabolane, kjer pa so kot neodvisne spremenljivke nastopale tudi fenofaze iste rastline (začetek cvetenja).

V drugo skupino izdelanih modelov spadajo *fenoklimatski* modeli, ki temeljijo na povezavi med fenološkimi in meteorološkimi spremenljivkami. Najboljše pojasnjevalne spremenljivke v teh modelih so bile povprečne mesečne temperature zraka ter GDD, čeprav se je koeficient determinacije še povečal, ko smo vključili ostale spremenljivke (mesečno količino padavin, PT, NAOI). V opisanih modelih (pregl. 4) smo GDD lahko vključili kot GDD_{uni} (GDD nad enotno $T_b=0^{\circ}C$) ali kot GDD_{stat} (GDD nad statistično določeno T_b), kar kaže na to, da obe metodi dajeta uporabne rezultate. Za postajo Ljubljana smo v vse *fenoklimatske* modele vključili tudi PT. Primerjava pojasnjene variabilnosti modelov glede na vključen termalni ali fototermalni čas je pokazala, da je uporaba PT upravičena, saj je v vseh primerih izboljšala kakovost modelov. Največje zvišanje % pojasnjene variabilnosti smo dosegli pri modelih za napoved cvetenja breze in robinije (13%), pri ostalih od 1% (cvetenje jabolane in leske) do 11% (olistanje breze in cvetenje regrata). Čeprav je pomen PT za razvoj rastlin poznan (Masle in sod., 1989), se le ta v fenoloških modelih redko uporablja (Menzel, 2003), ker pomeni potrebne dodatne vhodne spremenljivke in izračune.

Količina padavin in NAOI kot neodvisni meteorološki spremenljivki sta bili vključeni v relativno majhno število modelov, kar je lahko tudi posledica interkorelacij med temperaturo zraka, NAOI, padavinami in ostalimi dejavniki podnebja kot so npr. sončno obsevanje, evapotranspiracija ali temperatura tal (Wielgolaski, 2003).

Validacija regresijskih modelov je pokazala, da so odstopanja napovedi oziroma deleži pojasnjene variabilnosti primerljivi z že poznanimi fenološkimi modeli. Tako so bile vrednosti za povprečno absolutno napako 3,4 do 7,6 dni (pregl. 5) zelo blizu rezultatom, ki so jih predstavili Rötzer in sod. (2004) ter Garcia-Mozo in sod. (2002) za različne negojene rastline. Delež pojasnjene variabilnosti v naših modelih v obsegu 42% do 93% (pregl. 3 in 4) se ujema z izračuni fenoloških modelov številnih drugih avtorjev (Snyder in sod., 1999; Rötzer in sod., 2004). Razlogi za razlike med opazovanimi in modeliranimi vrednostmi so lahko številni. Mikroklimatske razmere določenega rastišča, kjer opazujemo fenofaze, in mesta, na katerem potekajo meteorološke meritve, se lahko razlikujejo v tolikšni meri, da temperaturni podatki ne opišejo dovolj natančno razmer za vsako posamezno rastišče (Snyder in sod., 2001). Genotip rastline ter njena starost vplivata na fenološki razvoj kakor tudi prisotnost ostalih rastlin (Kramer, 2000). Velika odstopanja v času pojava določene fenofaze povzročijo lahko tudi neklimatski parametri kot so tip tal, vodna vsebina tal, zaloge hranil, bolezni ali škodljivci (Wielgolaski, 2001).

5 SKLEPI

Na osnovi meteoroloških in fenoloških spremenljivk za obdobje 1955-2000 smo proučevali možnost napovedovanja fenološkega razvoja negojenih in gojenih rastlin v Sloveniji. Najpomembnejše sklepne ugotovitve naše raziskave so:

- korelacijska analiza je pokazala statistično značilne povezave med časom pojava fenofaz ter povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka, zimskim indeksom severno atlantskega nihanja, temperaturnimi vsotami in fototermalnim časom, medtem ko med časom pojava večine fenofaz in količino padavin nismo ugotovili odvisnosti,
- spodnje temperature praga, določene z metodo najmanjšega standardnega odklona temperaturnih vsot, so bile za najzgodnejše fenofaze negativne (-3°C do -1°C), za kasnejše med vrednostmi od 3°C do 7°C ,
- variabilnost izračunanih temperaturnih vsot med leti in lokacijami je bila velika, v krajih z nižjimi povprečnimi letnimi temperaturami je bila količina toplote, potrebna za razvoj določene rastlinske vrste, manjša kot v toplejših krajih,
- kot pojasnjevalne spremenljivke v *fenoloških* modelih so bile največkrat vključene fenološke faze breze, regrata in divjega kostanja, za katere lahko rečemo, da so v obravnavanem nizu podatkov najboljši fenoindikatorji,
- v *fenoklimatskih* modelih smo največ variabilnosti pojasnili s temperaturnimi vsotami in povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka, fototermalni čas, ki smo ga vključili v modele za postajo Ljubljana, je v vseh primerih izboljšal napovedno moč modelov,
- v poprečju smo lahko s *fenološkimi* modeli pojasnili 70%, s *fenoklimatskimi* pa 85% variabilnosti v času pojava fenofaz,
- izdelani modeli, ki smo jih preverili z metodo navzkrižnega preverjanja, so dali dokaj natančne in pravočasne napovedi fenološkega razvoja.

6 ZAHVALA

Avtorici se zahvaljujeta Agenciji republike Slovenije za meteorološke in fenološke podatke. Raziskava je bila opravljena v okviru programa P4-0085 (Aplikativna botanika, genetika in ekologija), ki ga financira Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo.

7 VIRI

- Ahas, R., Jaagus, J., Aasa, A. 2000. The phenological calendar of Estonia and its correlation with mean air temperature. *International Journal of Biometeorology*, 44, 4: 159-166.
- Arhiv fenoloških in meteoroloških podatkov Agencije republike Slovenije za okolje. 2000. Podatki za obdobje 1955-2000. Ljubljana, Agencija republike Slovenije za okolje, izpis iz baze podatkov.
- Baumgärtner, J., Schilperoord, P., Basett, P., Baiocchi, A., Jermini, M. 1998. The Use of a Phenology Model and of Risk Analyses for Planning Buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) Sowing Dates in Alpine Areas. *Agricultural systems*, 57: 557-569.
- Bergant, K., Kajfež-Bogataj, L., Črepinšek, Z. 2002. Statistical downscaling of GCM simulated average monthly air temperature to the beginning of flowering of dandelion

- (*Taraxacum officinale*) in Slovenia. *International Journal of Biometeorology*, 46: 22-32.
- Cenci, C.A., Ceschia, M. 2000. Forecasting of the flowering time for wild species observed at Guidonia, central Italy. *International Journal of Biometeorology*, 44: 88-96.
- Chmielewski, F.M., Müller, A., Bruns, E. 2004. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121: 69-78.
- Črepinšek, Z. 2002. Napovedovanje fenološkega razvoja rastlin na osnovi agrometeoroloških spremenljivk v Sloveniji. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, 135 str.
- Črepinšek, Z., Kajfež-Bogataj, L., Bergant, K. 2002. Correlation between spring phenophases and North Atlantic oscillation index in Slovenia. *Research reports*, Biotechnical Faculty, University of Ljubljana, Agriculture, 79: 89-98.
- Fernhout, P.D., Kurtz, C.F. 2001. Kurtz-Fernhout Software (10.03.1999). <http://www.kurtz-fernhout.com/help100/00000254.htm> (08.11.2001).
- García-Mozo, H., Gálan, C., Aira, M.J., Belmonte, J., Díaz de la Guardia, C., Fernández, D., Gutierrez, A.M., Rodriguez, F.J., Trigo, M.M., Dominguez-Vilches, E. 2002. Modelling start of oak pollen season in different climatic zones in Spain. *Agricultural and forest meteorology*, 110: 247-257.
- Huang, J.Z., Shresta, A., Tollenaar, M. 2001. Effect of temperature and photoperiod on the phenological development of wild mustard (*Sinapis arvensis* L.). *Field Crops Research*, 70: 75-86.
- Hurrell, J.W. 1996. Influence of Variations in Extratropical Wintertime Teleconnections on Northern Hemisphere Temperature. *Geophysical Research Letters*, 23: 665-668.
- Hurrell, J.W., Loon van, H. 1997. Decadal Variations in Climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Climatic Change*, 36: 301-326.
- Jones, P.D., Jonsson, T., Wheeler, D. 1997. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *International Journal of Climatology*, 17: 1433-1450.
- Kajfež-Bogataj, L., Bergant, K. 1998. Prediction of blossoming of apple tree (*Malus domestica* Borkh) by phenological models. Zbornik Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Kmetijstvo, 71: 83-89.
- Kott, I., Valter, J. 2000. Phenological Data procesing using some new means. V: New Contributions to phenology, Proceedings of the IV. Workshop on Phenology, Doksany, 12-13 Oct. 1999. Horakova P. (ur.). Praha, Czech Hydrometeorological Institute: 43-53.
- Kramer, K., Leinonen, I., Loustau, D. 2000. The importance of phenology for the evaluation impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems: an overview. *International Journal of Biometeorology*, 44: 67-75.
- Larcher, W. 1995. *Physiological Plant Ecology*. Springer, Berlin, 506 str.
- Lieth, H. 1997. Aims and Methods in Phenological Monitoring. V: Phenology in Seasonal Climates I. (ur.: Lieth, H., Schwartz, M.). Leiden, Backhuys Publishers, 143 str.
- Masle, J., Doussinault, G., Farquhar, G.D., Sun, B. 1989. Foliar stage in wheat correlates better to photothermal time than to thermal time. *Plant, Cell and Environment*, 12: 235-247.

- McMaster, G.S., Wilhelm, W.W. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87: 291-300.
- Menzel, A. 2003. Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. *Climatic Change*, 57: 243-263.
- Perry, K.B., Wehner, T.C., Johnson, G.L. 1986. Comparison of 14 methods to Determine Heat Unit Requirements for Cucumber Harvest. *Hort Science*, 21: 419-423.
- Piovesan, G., Schirone, B. 2000. Winter North Atlantic oscillation effects on the tree rings of the Italian beech (*Fagus sylvatica* L.). *International Journal of Biometeorology*, 44: 121-127.
- Rötzer, T., Grote, R., Pretzsch, H. 2004. The timing of bud burst and its effect on tree growth. *International Journal of Biometeorology*, 48: 109-118.
- Schaber, J., Badeck, F.W. 2003. Physiology-based phenology models for forest tree species in Germany. *International Journal of Biometeorology*, 47: 193-201.
- Scharrer, H., Schmidt, U. 1998. Cost 79. Integration of data and methods in agroclimatology. Phenological observations and data for key agricultural crops in Germany. Luxembourg, European Communities, Office for Official Publications of the European Communities: 74 str.
- Skaar, E. 1999. Time variability of the meteorological parameters used in phenological modelling. V: Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology. Sydney, 8-12 nov. 1999. De Dear R.J., Potter J.C. (Eds.). Sydney, Wesley Conference Centre, cD-ROM, ICB3.2: 1-5.
- Snyder, R.L., Spano, D., Cesaraccio, C., Duce, P. 1999. Determining degree-day thresholds from field observations. *International Journal of Biometeorology*, 42: 177-182.
- Spano, D., Cesaraccio, C., Duce, P., Snyder, R.L. 1999. Phenological stages of natural species and their use as climate indicators. *International Journal of Biometeorology*, 42: 124-133.
- Sparks, T.H., Jeffree, E.P., Jeffree, C.E. 2000. An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. *International Journal of Biometeorology*, 44, 2: 82-87.
- von Storch, H., Zwiers, F. W. 1999. Statistical analysis in climatology. Cambridge University Press, Cambridge, 484 str.
- Wielgolaski, F.E. 1999. Starting dates and basic temperatures in phenological observations of plants. *International Journal of Biometeorology*, 42: 158-168.
- Wielgolaski, F.E. 2001. Phenological modifications in plants by various edaphic factors. *International Journal of Biometeorology*, 45: 196-202.
- Wielgolaski, F.E. 2003. Climatic factors governing plant phenological phases along a Norwegian fjord. *International Journal of Biometeorology*, 47: 213-220.
- Wilks, D.S. 1995. Statistical methods in atmospheric sciences. Academic Press, San Diego, 467 str.
- Yang, S., Logan, J., Coffey, D.L. 1995. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74: 61-74.