

Agrovoc descriptors: climate, air temperature, air, weather data, meteorological observations, climatic change, greenhouse effect

Agris category code: P40

COBISS koda 1.01

Časovna analiza nekaterih klimatskih spremenljivk v Sloveniji^a

Tina ŽAGAR¹, Lučka KAJFEŽ-BOGATAJ², Zalika ČREPINŠEK³

Delo je prispelo 21. februarja 2006; sprejeto 11. avgusta 2006.

Received: February 21, 2006; accepted August 11, 2006.

IZVLEČEK

Na podlagi dolgoletnih podatkov o temperaturi zraka, padavinah, trajanju snežne odeje, pretokih rek in fenoloških podatkov, smo proučevali trend nekaterih klimatskih spremenljivk v Sloveniji za obdobje zadnjih petih desetletij. Iz nizov mesečnih podatkov smo izračunali letna in polletna povprečja. Rezultati neparametričnega preizkusa Mann-Whitney-Pettit, s katerim smo določali prelomne točke trendov, so pokazali, da se je naraščanje temperatur zraka, krajše trajanje snežne odeje in zgodnejše cvetenje navadne breze ter navadne leske začelo približno po letu 1987. Upadanje povprečnega srednjega pretoka rek se je začelo konec 80.let in upadanje padavin konec 60.let. Ničelno domnevo, da do prelomnega leta ni prišlo, smo zavrnili ($\alpha=0,05$), in zaključili, da je prišlo do sprememb klimatskih spremenljivk v Sloveniji zaradi globalnega segrevanja.

Ključne besede: trend klimatskih spremenljivk, Slovenija, časovne vrste, prelomna točka, preizkus Mann-Whitney-Pettit

ABSTRACT

CHANGE-POINT ANALYSIS OF SOME CLIMATE VARIABLES IN SLOVENIA

When studying observed climate changes it is often important to test stationarity of a given meteorological time series. The classical change-point problem is to test for the existence of a change-point and estimate its location if it exists. The study of climate trend in Slovenia is based on long-term records of air temperature, precipitation, duration of snow-cover, stream-flow and phenological data over the last five decades. For all data sets, the annual and half year time series were computed. The Mann-Whitney-Pettit test was used to test the null hypothesis and to determine the change-point. The results of Mann-Whitney-Pettit test indicate the increase in annual air temperature, the shorter duration of snow cover and earlier

^a Članek je nastal na osnovi podatkov diplomske naloge Tine Žagar. Mentorica: prof. dr. Lučka Kajfež-Bogataj.

This article is based on graduation thesis of Tina Žagar. Supervisor: Prof. Ph. D. Lucka Kajfež-Bogataj

¹ univ. dipl. ing. fizike, Onkološki Inštitut, 1000 Ljubljana, Zaloška 2, tzagar@onko-i.si

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

³ asist., dr., Biotehniška fakulteta, p.p. 2995, 1001 Ljubljana, zalika.crepinsek@bf.uni-lj.si

flowering of plants after year 1987. Decrease in stream-flow appears at the end of 80s and decrease in precipitation at the end of 60s. We can reject null hypothesis with significance level of $\alpha=0.05$ and conclude that there was a change in Slovenian climate due to global warming.

Key words: trend of climate variables, Slovenia, time series, change-point, Mann-Whitney-Pettit test

1 UVOD

Zaradi velikega vpliva vremena in ekstremnih vremenskih dogodkov na življenje ljudi je raziskovanje klime in klimatskih sprememb vse bolj nujno (Kajfež-Bogataj, 2005). Na tem področju je bilo narejeno veliko število znanstvenih raziskav, področje pa je zanimivo za najširši krog ljudi. Znanstveniki, politiki in javnost so se začeli zavedati, da se nam razsipno trošenje energije in onesnaževanje okolja lahko maščujeta.

Klima se spreminja v času in prostoru zaradi veliko različnih vzrokov. Največji izziv je razlikovati med spremembami, ki so posledice človekove dejavnosti, in naravnimi klimatskimi spremembami. Tipični razlog za proučevanje dolgoročnih trendov je povečanje učinka tople grede, ki ga povzročajo povečane emisije toplogrednih plinov zaradi človekove industrijske dejavnosti in spremembe rabe tal. Posledica pojava tople grede naj ne bi bilo samo dolgoletno segrevanje nižjih plasti atmosfere, ampak tudi trendi drugih klimatskih spremenljivk (Schönwiese in Rapp, 1997). Mednarodni forum za klimatske spremembe (IPCC, angl. The Intergovernmental Panel on Climate Change) je leta 2001 zaključil tretji petletni cikel svojega delovanja, ki ga lahko povzamemo v stavek (ARSO, 2004): »Obstajajo novi in trdnejši dokazi, da je večina porasta temperature ozračja v svetovnem merilu v zadnjih petdesetih letih povezana s človeško aktivnostjo.« V naši raziskavi ne bomo analizirali fluktuacij v krajših časovnih obdobjih, ampak le daljše časovne vrste.

Z različnimi statističnimi metodami, ki jih s skupnim imenom »change point analysis« najdemo v literaturi (Shaban, 1980), se poizkuša ugotavljati prelomne točke in iskati nehomogenosti v meteoroloških časovnih vrstah. Prvi je te metode začel razvijati in analizirati Page (1957), preprosto neparametrično metodo znano pod imenom Mann-Whitney-Pettit preizkus je objavil Pettit (1979), zelo hitro pa so se te metode iskanja prelomnih točk začele uveljavljati v klimatologiji (Woodward in Gray, 1993; Lanzante, 1996). Še posebej zanimiva je postala uporaba teh metod pri zaznavanju podnebnih sprememb v različnih nizih klimatoloških spremenljivk, kjer samo analiza npr. linearnega trenda ne zadošča (Lund in Reeves, 2002; Mauget, 2003; Mantua, 2004).

Pri našem delu smo želeli z metodo iskanja prelomnih točk ugotoviti, ali je bila v Sloveniji že opažena sprememba v klimatskih procesih, ki generirajo meteorološke časovne vrste. Predpostavili smo, da ne poznamo časa, v katerem se je sprememba dejansko zgodila. Četudi bi vedeli, kdaj so se spremembe zgodile, ne poznamo časa, ob katerem bo ta sprememba dejansko začela vplivati na obnašanje naših časovnih vrst. V primeru, da prelomna točka nastopi pri vseh časovnih nizih v približno istem letu, bomo lahko določili trend klimatskih spremenljivk v Sloveniji. Podobno raziskavo so naredili na Irskem (Kiely, 1999), kjer so ugotovili spremembo v trendu

padavin okoli leta 1975; po tem prelomnem letu so zabeležili večjo količino padavin. Analiza ekstremnih dogodkov, povezanih s padavinami, je pokazala veliko večji delež ekstremov v obdobju po letu 1975. Potrdili so tudi povezavo med indeksom severno atlantskega nihanja (NAOI) in padavinami v Zahodni Evropi. Analiza letnih časovnih nizov NAOI s preizkusom Mann-Whitney-Pettit je potrdila zmanjšanje letnega NAOI po letu 1961 z verjetnostjo za prelomno leto 0,723. Za zimsko obdobje (december–marec) pa so nasprotno ugotovili naraščanje NAOI po letu 1981 z verjetnostjo 0,988 (Kiely, 1999). V Italiji (Tomozeiu in sod., 2000) so ugotovili naraščanje padavin po letu 1962. Pri nekaterih postajah se je poleg tega pojavil manjši trend upadanja po letu 1980. Ugotovili so, da bi na spremenljivost poletnih padavin lahko vplival skupen proces, ki deluje na večji prostorski skali.

Višje temperature zraka v spomladanskem obdobju na območjih zmernih geografskih širin vplivajo na zgodnejši fenološki razvoj rastlin, jesenske faze pa kažejo manjše spremembe, tako da na podaljšanje rastne sezone vplivajo predvsem zgodnejše pomladi (Črepinšek, 2002). Ahas (1999) je na podlagi dolgoletnih fenoloških podatkov ocenil spremembe in trend klimatskih spremenljivk v Estoniji. Na podlagi nelinearne analize trenda je ugotovil, da so pomladi v Estoniji zgodnejše za približno osem dni od pomladi pred osemdesetimi leti. Najhitrejše je bilo ogrevanje v zadnjih 40. letih. V svoji doktorski disertaciji je Črepinškova proučevala fenološki razvoj rastlin na osnovi agrometeoroloških spremenljivk v Sloveniji (Črepinšek, 2002). Med drugim je ugotovila povezanost med nastopom fenofaz cvetenja in povprečnimi temperaturami zraka; povprečni korelacijski koeficient je znašal med -0,7 in -0,8. Nekoliko manjše so bile vrednosti koeficientov za fenofaze olistanja. Za nastop jesenskih fenofaz je bila ta korelacija manjša in pozitivna, kar pomeni, da višje temperature zraka zakasni konec rastne sezone. Analizirala je tudi vpliv NAOI na pojav pomladanskih fenofaz v Sloveniji. Korelacija med zimskim NAOI in povprečno zimsko temperaturo zraka (december–marec) je bila za vse lokacije statistično zelo značilna, povprečna vrednost korelacijskega koeficienta pa +0,58. Analiza povezanosti povprečne mesečne količine padavin z nastopom fenofaz je pokazala, da v naših razmerah v spomladanskem času količina rastlinam dostopne vode ni problematična, tako da količina padavin, četudi bi le-ta v ekstremno sušnih razmerah vplivala na čas pojava fenofaz, v danih razmerah na čas cvetenja in olistanja ni vplivala statistično značilno.

Namen naše raziskave je preveriti primernost preizkusa Mann-Whitney-Pettit za obdelavo meteoroloških podatkov, ki imajo obliko časovnih vrst, določitev prelomnih točk, izračunati verjetnost za najdene prelomne točke in ugotoviti, ali je sprememba statistično značilna. V primeru, da bo prelomna točka nastopila pri vseh nizih v približno istem obdobju, bomo določili trende klimatskih spremenljivk in stopnjo tveganja, da so ugotovljeni trendi samo posledica naključnosti.

2 MATERIAL

Za iskanje prelomne točke v izbranih časovnih nizih smo uporabili preizkus Mann-Whitney-Pettit (Pettit, 1979) pri izbrani stopnji tveganja $\alpha=0,05$. Obdelali smo podatke o povprečni mesečni temperaturi zraka, padavinah in številu dni v mesecu s snežno odejo z osmih meteoroloških postaj v Sloveniji, mesečna povprečja srednjih pretokov površinskih voda za šest lokacij in fenološke podatke o cvetenju navadne breze (*Betula pendula* Roth) in navadne leske (*Corylus avellana* L.) na osmih lokacijah. Vse podatke in metapodatke za meteorološke,

vodomerne in fenološke postaje smo dobili iz arhivov Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO, 2004). Zaradi enake uporabljene statistične metode so naši rezultati primerljivi z rezultati podobnih raziskav v Evropi. Uporabili smo podatke z merskih postaj, katerih časovna vrsta je najbolj homogena. To pomeni, da je bilo zajemanje podatkov čim manj moteno s premiki postaj in zamenjavo instrumentov. V primeru manjkajočih podatkov za določen mesec smo vzeli povprečje za ta mesec desetih predhodnih in desetih sledečih let. V preglednici 1 je seznam meteoroloških postaj, ki smo jih vključili v našo raziskavo, hkrati je za posamezno postajo prikazana dolžina obdobja, za katerega smo imeli na voljo meteorološke podatke.

Podatki za povprečne srednje mesečne vrednosti pretokov površinskih voda so bili zbrani na naslednjih šestih lokacijah: Videm I na Dravinji, Radovljica I na Savi, Litija I, Nazarje na Savinji, Podbočje na Krki in Kobarid na Soči.

Preglednica 1: Meteorološke postaje in obdobja, za katerega razpolagamo z meteorološkimi podatki

Table 1: Meteorological stations and periods with available meteorological data

| Meteorološka postaja | Obdobje |
|----------------------|-----------|
| Celje na Lavi | 1948-2003 |
| Kočevje | 1950-2003 |
| Ljubljana Bežigrad | 1948-2003 |
| Murska Sobota | 1950-2003 |
| Novo mesto | 1951-2003 |
| Postojna | 1950-2003 |
| Rateče | 1948-2003 |
| Slap pri Vipavi | 1961-2003 |

Fenološka opazovanja potekajo na izbranih negojenih, splošno razširjenih zeliščih, travah, gozdnem drevju in grmičevju in na izbranih gojenih kmetijskih rastlinskih vrstah. Obdelali smo podatke za začetek cvetenja navadne breze in navadne leske, ki spadata med gozdno drevje in grmičevje. Za navadno lesko smo analizirali podatke od leta 1955 do 2000, za navadno brezo pa od leta 1955 do 2002. Rastlini smo izbrali, ker sta splošno razširjeni po skoraj vsej Sloveniji, niz podatkov pa je kvaliteten in popoln. Obravnavali smo naslednje postaje: Celje, Ilirska Bistrica, Ljubljana, Maribor, Murska Sobota, Novo mesto, Lesce in Rateče.

3 METODE

Neparametrični preizkus Mann-Whitney-Pettit (Pettit, 1980) je primeren, kadar želimo ugotoviti, ali je bila v vrsti dogodkov sprememba v procesih, ki generirajo opazovano časovno vrsto dogodkov. Večinoma v takšnih primerih ne poznamo časa, v katerem se je sprememba dejansko zgodila. Tudi v primerih, ko vemo, kdaj se je sprememba zgodila, ne poznamo časa, ob katerem bo ta sprememba dejansko začela vplivati na obnašanje časovne vrste, ki jo opazujemo (Siegel in Castellan, 1988). Preizkus Mann-Whitney-Pettit je primeren tudi za odkrivanje napak v časovnih vrstah.

Imamo vrsto naključnih zveznih spremenljivk Y_1, Y_2, \dots, Y_N in prelomno točko m , ki je ne poznamo. Spremenljivke Y_i za $i = 1, \dots, m$ imajo skupno porazdelitveno funkcijo $F_1(y)$ in spremenljivke Y_i za $i = m+1, \dots, N$ imajo skupno porazdelitveno funkcijo $F_2(y)$. Porazdelitvenih funkcij ne poznamo; vemo le to, da sta zvezni in različni. Preizkušali bomo ničelno domnevo, da sprememba ne nastopi; $H_0: m = N$. Alternativna domneva se torej glasi, da sprememba nastopi; $H_1: 1 \leq m < N$.

Za zvezne številske spremenljivke lahko testno statistiko $U_{k,N}$ zapišemo s pomočjo teorije rangov (Pettit, 1979):

$$U_{k,N} = 2W_k - k(N+1) \text{ in} \quad (1)$$

$$W_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad (2)$$

kjer so

- N - velikost časovne vrste,
- k - indeks, ki teče po členih časovne vrste; $k = 2, 3, \dots, N$,
- i - sumacijski indeks,
- $U_{k,N}$ - statistika za določanje prelomne točke,
- W_k - vsota rangov do k-tega člena in
- r_i - rang i-tega člena časovne vrste.

Verjetnost $p(k)$ za prelomno točko za posamezno vrednost $U_{k,N}$ je v približku enaka:

$$p(k) = 1 - e^{\frac{-6U_{k,N}^2}{N^3+N^2}}. \quad (3)$$

Za dolge vrste, kjer je indeks k večji od deset ali je vrednost $(N-k)$ večja od deset, za preizkušanje H_0 uporabimo testno statistiko z (Siegel in Castellan, 1988):

$$z = \frac{W - \frac{k(N+1)}{2}}{\sqrt{\frac{k(N-k)(N+1)}{12}}}, \quad (4)$$

kjer sta

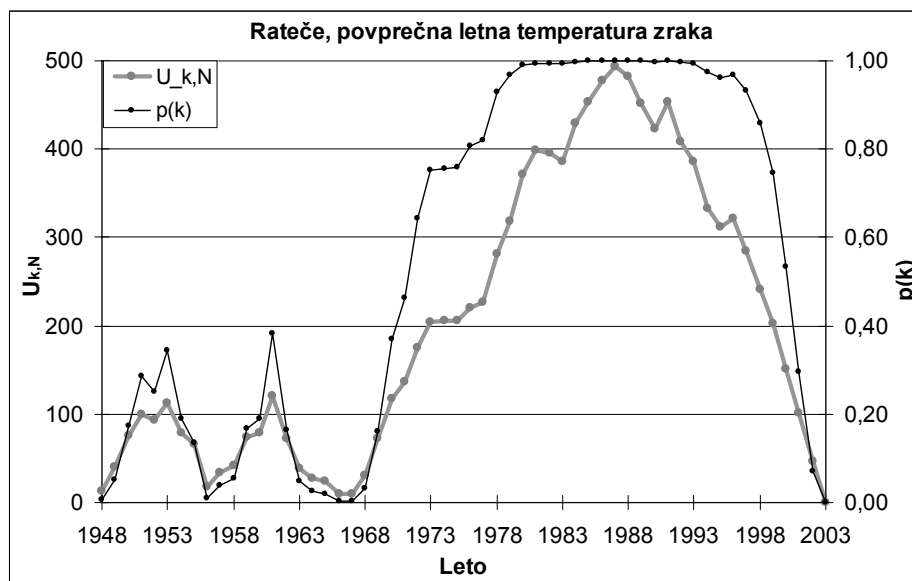
- z - testna statistika za določanje verjetnosti, da velja H_0 , in
- W - vrednost za W_k pri tistem k , kjer ima statistika $U_{k,N}$ maksimum.

Za vsak člen časovne vrste je torej potrebno izračunati vrednosti $U_{k,N}$. Največja vrednost $U_{k,N}$ je iskana prelomna točka, za katero je potrebno izračunati še verjetnost za to prelomno točko $p(k)$ in testno statistiko za preverjanje ničelne domneve, z .

4 REZULTATI

V preglednicah 2, 3 in 4 so zbrana izračunana prelomna leta, verjetnosti za izračunano prelomno leto, zgornje meje za verjetnost, da velja H_0 , in vrsta spremembe (naraščanje ali upadanje) za dano klimatološko spremenljivko. Vse vrednosti v preglednicah, razen vrste spremembe, so izračunane s preizkusom Mann-Whitney-Pettit. Ob vsaki meteorološki in vodomerni postaji je v preglednici napisano tudi obdobje, za katerega so bili podatki obdelani. Rezultatov, za katere so verjetnosti za prelomna leta manjše od vrednosti 0,70 ali za katere so verjetnosti, da velja H_0 , večje od izbrane stopnje tveganja $\alpha=0,05$, nismo upoštevali pri diskusiji.

Primer rezultatov preizkusa Mann-Whitney-Pettit bomo prikazali na najbolj homogenih podatkih, to je časovni vrsti za temperaturo zraka na meteorološki postaji Rateče (slika 1). Prelomna točka je bila v letu 1987 z verjetnostjo 1,00. Izračunana vrednost testne statistike $|z|$ je 4,48. Pri tej vrednosti za $|z|$ je verjetnost, da velja H_0 , manjša kot 0,00003, kar je veliko manj od izbrane stopnje tveganja ($\alpha=0,05$), zato H_0 zavrnemo v korist H_1 in zaključimo, da podatki s postaje Rateče kažejo začetek segrevanja od leta 1987 naprej.



Slika 1: Statistika $U_{k,N}$ in verjetnost za prelomno točko $p(k)$, izračunani z Mann-Whitney-Pettit preizkusom za povprečno letno temperaturo zraka na postaji Rateče (1948-2003, $N=56$). Prelomna točka je leto 1987 z verjetnostjo $p(k)=1,00$.

Figure 1: Statistic $U_{k,N}$ and probability for change-point $p(k)$, calculated with Mann-Whitney-Pettit test for the mean annual air temperature for station Rateče (1948-2003, $N=56$). Change-point is year 1987 with probability $p(k)=1.00$.

Pri vseh meteoroloških postajah je izračunano prelomno leto, če gledamo celoletne podatke za temperaturo zraka, leto 1987 z verjetnostjo najmanj 0,99. Za hladno polovico leta je bilo za vse meteorološke postaje prelomno leto 1986 z verjetnostjo najmanj 0,95. Verjetnost, da velja H_0 , je za celoletne podatke največ 0,0005 in za hladno polovico leta največ 0,005. V obeh primerih je verjetnost veliko manjša od izbrane stopnje tveganja. Prelomna leta za podatke toplih polovic leta so bolj zgodnja, po vsej verjetnosti zaradi večjega števila ekstremnih dogodkov v poletnih mesecih kot v zimskih.

Podatki za število dni s snežno odejo za toplo polovico leta dajejo nejasne rezultate zaradi premajhnih številskih vrednosti in zaradi dejstva, da v večini let snežne odeje v poletnih mesecih ni bilo. Zato je smiselno upoštevati samo rezultate za celoletna in zimska obdobja. Vse meteorološke postaje so zabeležile upadanje števila dni s snežno odejo. Na postaji Murska Sobota je prelomno leto nastopilo leta 1969, na vseh ostalih postajah pa v letu 1986 ali 1987 z verjetnostjo najmanj 0,86.

Spremembe v cvetenju navadne leske in navadne breze se kot posledica spremembe temperatur poznajo z zamikom enega leta, in sicer je prelomno leto nastopilo 1987 oziroma 1988. Rezultati analize fenoloških podatkov potrjujejo rezultate številnih raziskav zadnjih let (Ahas, 1999; Črepinšek, 2002; Chmielewski in sod., 2004), ki so pokazale, da višje temperature zraka v spomladanskem obdobju na območju zmernih geografskih širin vplivajo na zgodnejši fenološki razvoj rastlin.

Podatki za hladne polovice leta na vodomernih postajah so pokazali začetek upadanja povprečnega srednjega pretoka konec 60.-let. Nasprotno se za toplo polovico leta in

za celoletne podatke rezultati zelo razlikujejo in prelomna leta imajo razpon od leta 1950 do 1988. Tudi verjetnosti za posamezna prelomna leta se precej razlikujejo.

Upadanje količine padavin se je začelo v 70.letih na treh postajah (Kočevje, Rateče in Slap pri Vipavi). Na meteorološki postaji Postojna je prišlo do naraščanja padavin po letu 1975. Sprememb v padavinah na meteoroloških postajah in sprememb pri pretokih rek na vodomernih postajah ne moremo povezati, saj bi za ta namen morali obdelati gostejšo mrežo postaj in jih med sabo primerjati po povodjih.

Preglednica 2: Rezultati preizkusa Mann-Whitney-Pettit za največje mesečne pretoke. Krepko tiskane vrednosti označujejo verjetnosti za prelomna leta, ki so manjše od vrednosti 0,70 ter verjetnosti $P(H_0)$, večje od izbrane stopnje tveganja ($P(H_0) > \alpha=0,05$), ko velja H_0 .

Table 2: Results of Mann-Whitney-Pettit test for maximum monthly stream-flows. Bold prints indicate probabilities for change-point years, smaller than 0.70 and probabilities $P(H_0)$ greater from significance level ($P(H_0) > \alpha=0.05$), when H_0 is valid.

| Obdobje | Prelomno leto | Verjetnost | Vrsta spremembe | $P(H_0) \leq$ | |
|---|-----------------|------------|-----------------|---------------|---------------------------------|
| | | | | | PRETOKI POVRŠINSKIH VODA |
| Videm I (Dravinja) 1946 - 2000 | leto | 1950 | 0,36 | upadanje | 0,05 |
| | hladna polovica | 1970 | 1,00 | upadanje | 0,0005 |
| | topla polovica | 1950 | 0,44 | upadanje | 0,04 |
| Radovljica I (Sava) 1945 - 2000 | leto | 1980 | 0,72 | upadanje | 0,05 |
| | hladna polovica | 1967 | 0,90 | upadanje | 0,02 |
| | topla polovica | 1988 | 0,95 | upadanje | 0,005 |
| Litija I (Sava) 1927 - 2000 | leto | 1980 | 0,99 | upadanje | 0,0005 |
| | hladna polovica | 1969 | 0,92 | upadanje | 0,02 |
| | topla polovica | 1978 | 0,93 | upadanje | 0,01 |
| Nazarje (Savinja) 1926 - 2000 | leto | 1938 | 1,00 | upadanje | 0,0005 |
| | hladna polovica | 1938 | 0,98 | upadanje | 0,0005 |
| | topla polovica | 1937 | 1,00 | upadanje | 0,0005 |
| Nazarje (Savinja) 1945 - 2000 | leto | 1957 | 0,70 | upadanje | 0,04 |
| | hladna polovica | 1969 | 0,80 | upadanje | 0,04 |
| | topla polovica | 1953 | 0,72 | naraščanje | 0,02 |
| Podbočje (Krka) 1933 - 2000 | leto | 1966 | 0,95 | upadanje | 0,01 |
| | hladna polovica | 1966 | 0,91 | upadanje | 0,02 |
| | topla polovica | 1974 | 0,60 | naraščanje | 0,09 |
| Kobarid (Soča) 1947 - 2000 | leto | 1980 | 0,83 | upadanje | 0,03 |
| | hladna polovica | 1967 | 0,88 | upadanje | 0,03 |
| | topla polovica | 1979 | 0,97 | upadanje | 0,005 |

Verjetnosti za izračunana prelomna leta za padavine na vseh meteoroloških postajah so veliko manjše od verjetnosti za izračunana prelomna leta za temperature zraka. Prelomna leta se lahko za letoletna obdobja, za toplo in za hladno polovico leta za isto postajo zelo razlikujejo.

Preglednica 3: Rezultati Mann-Whitney-Pettit preizkusa za temperature zraka, padavine in trajanje snežne odeje. Za tri različna obdobja (celoletno obdobje, hladna in topla polovica leta) so izračunana prelomna leta, verjetnost za posamezno prelomno leto, vrsta spremembe (naraščanje, upadanje) in verjetnost, da velja ničelna hipoteza (H_0). Krepko tiskane vrednosti označujejo verjetnosti za prelomna leta, ki so manjše od vrednosti 0,70 ter verjetnosti $P(H_0)$, večje od izbrane stopnje tveganja ($P(H_0) > \alpha=0,05$), ko velja H_0 .

Table 3: Results of Mann-Whitney-Pettit test for annual air temperature, precipitation and duration of snow-cover. Change-point years, probability for the change-point year, type of the change (increase, decrease) and probability, that H_0 is valid, are calculated for three different periods (entire year, cold-half of the year and warm-half of the year). Bold prints indicate probabilities for change-point years, smaller than 0.70 and probabilities $P(H_0)$ greater than significance level ($P(H_0) > \alpha=0.05$), when H_0 is valid.

| TEMPERATURA | Obdobje | Prelomno leto | Verjetnost | Vrsta spremembe | $P(H_0) \leq$ |
|---------------------------------------|-----------------|---------------|------------|-----------------|---------------|
| Celje 1948 - 2003 | leto | 1987 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| | hladna polovica | 1986 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| | topla polovica | 1981 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| Kočevje 1950 - 2003 | leto | 1987 | 0,99 | naraščanje | 0,0005 |
| | hladna polovica | 1986 | 0,95 | naraščanje | 0,005 |
| | topla polovica | 1980 | 0,99 | naraščanje | 0,001 |
| Ljubljana 1948 - 2003 | leto | 1987 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| | hladna polovica | 1986 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| | topla polovica | 1981 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| Murska Sobota 1950 - 2003 | leto | 1987 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| | hladna polovica | 1986 | 0,99 | naraščanje | 0,001 |
| | topla polovica | 1985 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| Novo mesto 1951 - 2003 | leto | 1987 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| | hladna polovica | 1986 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| | topla polovica | 1980 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| Postojna 1950 - 2003 | leto | 1987 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| | hladna polovica | 1986 | 0,99 | naraščanje | 0,001 |
| | topla polovica | 1981 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| Rateče 1948 - 2003 | leto | 1987 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| | hladna polovica | 1986 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| | topla polovica | 1981 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| Slap pri Vipavi 1961 - 2003 | leto | 1987 | 1,00 | naraščanje | 0,0005 |
| | hladna polovica | 1986 | 0,98 | naraščanje | 0,005 |
| | topla polovica | 1991 | 0,93 | naraščanje | 0,005 |

(se nadaljuje)

Preglednica 3 (nadaljevanje)

| PADAVINE | Obdobje | Prelomno leto | Verjetnost | Vrsta spremembe | $P(H_0) \leq$ |
|---------------------------------------|-----------------|---------------|-------------|-----------------|---------------|
| Celje 1948 - 2003 | leto | 1965 | 0,87 | upadanje | 0,02 |
| | hladna polovica | 1966 | 0,49 | upadanje | 0,11 |
| | topla polovica | 1974 | 0,57 | upadanje | 0,10 |
| Kočevje 1950 - 2003 | leto | 1981 | 0,98 | upadanje | 0,005 |
| | hladna polovica | 1967 | 0,83 | upadanje | 0,03 |
| | topla polovica | 1978 | 0,87 | upadanje | 0,03 |
| Ljubljana 1948 - 2003 | leto | 1987 | 0,69 | upadanje | 0,05 |
| | hladna polovica | 1958 | 0,53 | upadanje | 0,07 |
| | topla polovica | 1960 | 0,53 | upadanje | 0,08 |
| Murska Sobota 1950 - 2003 | leto | 1996 | 0,70 | upadanje | 0,02 |
| | hladna polovica | 1994 | 0,60 | naraščanje | 0,03 |
| | topla polovica | 1975 | 0,55 | upadanje | 0,11 |
| Novo mesto 1951 - 2003 | leto | 1978 | 0,51 | naraščanje | 0,12 |
| | hladna polovica | 1975 | 0,75 | naraščanje | 0,05 |
| | topla polovica | 1965 | 0,50 | naraščanje | 0,10 |
| Postojna 1950 - 2003 | leto | 1975 | 0,98 | naraščanje | 0,005 |
| | hladna polovica | 1975 | 0,91 | naraščanje | 0,02 |
| | topla polovica | 1959 | 0,84 | naraščanje | 0,01 |
| Rateče 1948 - 2003 | leto | 1980 | 0,99 | upadanje | 0,001 |
| | hladna polovica | 1970 | 0,92 | upadanje | 0,02 |
| | topla polovica | 1979 | 0,93 | upadanje | 0,02 |
| Slap pri Vipavi 1961 - 2003 | leto | 1969 | 0,95 | upadanje | 0,005 |
| | hladna polovica | 1967 | 0,84 | upadanje | 0,005 |
| | topla polovica | 1978 | 0,77 | upadanje | 0,05 |

| TRAJANJE SNEŽNE ODEJE | Obdobje | Prelomno leto | Verjetnost | Vrsta spremembe | $P(H_0) \leq$ |
|---------------------------------|-----------------|---------------|-------------|-----------------|---------------|
| Celje 1948 - 2003 | leto | 1987 | 0,86 | krajša | 0,02 |
| | hladna polovica | 1986 | 0,87 | krajša | 0,02 |
| | topla polovica | 1954 | 0,62 | daljša | 0,02 |
| Kočevje 1950 - 2003 | leto | 1987 | 0,94 | krajša | 0,005 |
| | hladna polovica | 1986 | 0,94 | krajša | 0,01 |
| | topla polovica | 1997 | 0,49 | krajša | 0,04 |
| Ljubljana 1948 - 2003 | leto | 1987 | 0,97 | krajša | 0,005 |
| | hladna polovica | 1986 | 0,95 | krajša | 0,005 |
| | topla polovica | 1954 | 0,75 | krajša | 0,01 |

(se nadaljuje)

Preglednica 3 (nadaljevanje)

| TRAJANJE SNEŽNE ODEJE | Obdobje | Prelomno leto | Verjetnost | Vrsta spremembe | $P(H_0) \leq$ |
|---------------------------------------|-----------------|------------------|-------------|--------------------|---------------|
| Murska Sobota 1950 - 2003 | leto | 1970 | 0,91 | krajša | 0,02 |
| | hladna polovica | 1969 | 0,93 | krajša | 0,01 |
| | topla polovica | 1976 | 0,65 | daljša | 0,08 |
| Novo mesto 1951 - 2003 | leto | 1987 | 0,94 | krajša | 0,005 |
| | hladna polovica | 1986 | 0,90 | krajša | 0,01 |
| | topla polovica | 1982 | 0,38 | krajša | 0,16 |
| Postojna 1950 - 2003 | leto | 1987 | 1,00 | krajša | 0,0005 |
| | hladna polovica | 1985 | 1,00 | krajša | 0,0005 |
| | topla polovica | 1986 | 0,94 | krajša | 0,01 |
| Rateče 1948 - 2003 | leto | 1988 | 0,98 | krajša | 0,001 |
| | hladna polovica | 1987 | 0,89 | krajša | 0,01 |
| | topla polovica | 1987 | 0,88 | krajša | 0,02 |
| Slap pri Vipavi 1961 - 2003 | leto | 1988 | 0,98 | krajša | 0,005 |
| | hladna polovica | 1986 | 0,99 | krajša | 0,001 |
| | topla polovica | 1991 | 0,49 | krajša | 0,10 |

Preglednica 4: Rezultati Mann-Whitney-Pettit preizkusa za začetek cvetenja navadne breze (1955–2002) in navadne leske (1955–2000). Izračunana so prelomna leta, verjetnost za posamezno prelomno leto, vrsta spremembe (zgodnejše, kasnejše) in verjetnost, da velja ničelna hipoteza (H_0). Krepko tiskane vrednosti označujejo verjetnosti za prelomna leta, ki so manjše od vrednosti 0,70 ter verjetnosti $P(H_0)$, večje od izbrane stopnje tveganja ($P(H_0) > \alpha=0,05$), ko velja H_0 .

Table 4: Results of Mann-Whitney-Pettit test for the beginning of birch (1955-2002) and hazel (1955-2000) flowering. Change-point years, probability for the change-point year, type of the change (earlier, later) and probability, that H_0 is valid, are calculated. Bold prints indicate probabilities for change-point years, smaller than 0.70 and probabilities $P(H_0)$ greater than significance level ($P(H_0) > \alpha=0.05$), when H_0 is valid.

| | Obdobje | Prelomno leto | Verjetnost | Vrsta spremembe | $P(H_0) \leq$ |
|--------------------------|------------------|------------------|-------------|--------------------|---------------|
| Navadna leska | Celje | 1987 | 0,91 | zgodnejše | 0,01 |
| | Ilirska Bistrica | 1987 | 0,85 | zgodnejše | 0,02 |
| | Ljubljana | 1987 | 0,99 | zgodnejše | 0,001 |
| | Maribor | 1987 | 0,97 | zgodnejše | 0,005 |
| | Murska Sobota | 1988 | 0,87 | zgodnejše | 0,02 |
| | Novo mesto | 1987 | 0,98 | zgodnejše | 0,005 |
| | Lesce | 1987 | 0,93 | zgodnejše | 0,01 |
| | Rateče | 1988 | 0,998 | zgodnejše | 0,0005 |
| Navadna breza | Celje | 1987 | 0,998 | zgodnejše | 0,0005 |
| | Ilirska Bistrica | 1988 | 0,82 | zgodnejše | 0,03 |
| | Ljubljana | 1988 | 0,98 | zgodnejše | 0,005 |
| | Maribor | 1988 | 0,98 | zgodnejše | 0,001 |
| | Murska Sobota | 1988 | 0,92 | zgodnejše | 0,01 |
| | Novo mesto | 1971 | 0,67 | zgodnejše | 0,06 |
| | Lesce | 1988 | 0,87 | zgodnejše | 0,02 |
| | Rateče | 1985 | 0,67 | zgodnejše | 0,07 |

5 RAZPRAVA

Obdelani so bili različni klimatski podatki in sicer temperatura zraka, količina padavin, pretoki rek, trajanje snežne odeje ter fenološki podatki. Pri vseh časovnih vrstah je bila prisotna enaka dinamika. Rezultati potrjujejo, da je v Sloveniji prišlo do sprememb v klimi zaradi antropogenega vpliva na okolje in na atmosfero.

Rezultati za posamezne spremenljivke se pri posameznih postajah ujemajo za hladne polovice let, medtem ko smo za letošnje podatke ugotovili večja odstopanja. Vreme v zimskih mesecih je namreč odraz globalnih cirkulacij atmosfere in zato ujemanja prelomnih let za zimske časovne vrste odražajo globalne klimatske spremembe. Nasprotno je v poletnih mesecih frontalni vpliv manjši in rezultati analiz lahko odražajo posledice lokalnega vremena. Pri naši analizi smo se poglobili predvsem v rezultate za časovne vrste hladnih polovic leta, ki potrjujejo globalno segrevanje. Izračuni so potrdili tezo, da višje temperature zraka v spomladanskem obdobju na območju zmernih geografskih širin vplivajo na zgodnejši fenološki razvoj rastlin, saj prelomno leto za cvetenje breze in leske nastopi približno eno leto po prelomnem letu za temperature zraka v zimskem in letošnjem obdobju.

V Sloveniji je prelomna točka nastopila dobro desetletje kasneje kot prelomno leto v globalnem klimatskem sistemu Zemlje (Houghton, 2001; Kiely, 1999). Klima se lokalno različno razvija zaradi geoloških značilnosti, bližine oceanov ipd. Tako se globalno segrevanje zaradi antropogenega vpliva na posameznih območjih različno odraža v intenziteti kot tudi v trajanju. Na primer, v raziskavi klimatskih spremenljivk na Irskem (Kiely, 1999) so ugotovili značilne spremembe v trendih količine padavin in zanesljive rezultate pri raziskavah padavin in pretokov rek. Zaradi bližine Atlantika so vodni sistemi na Irskem precej stabilni in se jih da lepo proučevati, medtem ko so zaradi istega vzroka spremembe v temperaturah zraka manj izrazite. Nasprotno so v Sloveniji temperature zraka statistično gledano stabilnejše od padavin zaradi odsotnosti bližine večjega morja in zaradi velike geografske raznolikosti, zaradi česar so padavine veliko bolj lokalnega značaja.

Za posamezne regije je veliko težje oceniti spremembe kot za svet v celoti. Zelo težko ali skoraj nemogoče je iz rezultatov globalnih klimatskih modelov izluščiti lokalne napovedi (Bergant in Kajfež-Bogataj, 2005). Še najlažje si pomagamo s temeljitim in zelo natančnim spremljanjem lokalne spremenljivosti klimatskih razmer, dobrim poznavanjem povezav med posameznimi elementi klime in njihovo spremenljivostjo. V ta namen so uporabne dolgoletne meteorološke meritve pod enakimi pogoji in v nespremenjeni okolici. V Sloveniji žal nimamo merskih mest z zaščiteni okolico, na katerih bi lahko ocenili, kako so se klimatske razmere spremenile v zadnjih desetletjih neodvisno od naraščajoče urbanizacije in drugih sprememb v okolici merskih mest (ARSO, 2004). Po zgledu drugih držav bomo morali v prihodnje tudi pri nas zavarovati vsaj 5 merskih mest v različnih pokrajinah, na katerih bomo lahko spremljali klimatske spremembe, ki se v vseh pokrajinah ne kažejo na enak način.

Preizkus Mann-Whitney-Pettit je primeren tudi za odkrivanje napak v časovnih vrstah. V podatkih, ki jih imamo na razpolago, imamo za to dva nazorna primera. Na postaji Nazarje (obdobje 1926-2000) je prišlo do preloma leta 1938. Na postaji Litija I (obdobje 1927-2000) nismo dobili podobnih rezultatov, zato lahko sklepamo, da

vzrok preloma ni globalno segrevanje, ampak je lahko posledica prehoda na opazovanje z limnigramom leta 1933, kar se je zgodilo pet let prej. Ali je začetek opazovanja z limnigramom dejansko vzrok za prelomno leto, ne moremo zanesljivo potrditi, saj so metapodatki nepopolni, poleg tega pa ne vemo, s kakšno zakasnitvijo se nehomogenosti na postaji odražajo na meritvah. Če bi hoteli določiti, kolikšna je zakasnitev, bi ponovno potrebovali natančno bazo metapodatkov za vse postaje, da bi lahko nehomogenosti primerjali med sabo. Drug primer je opazovanje začetka cvetenja za brezo na postaji Novo mesto, kjer prelomno leto 1971 odstopa od rezultatov na ostalih postajah. Vzroki so lahko različni, od zamenjave opazovanega drevesa do zamenjave opazovalca, vendar zaradi pomanjkanja metapodatkov za fenološke postaje ne moremo zanesljivo ugotoviti, zakaj in kdaj je do nehomogenosti prišlo.

V primeru segrevanja ozračja naj bi se količina dežja povečala in količina snega zmanjšala (Schönwiese in Rapp, 1997). Ta pojav naj bi bil še posebej izrazit v zimskem času. Iz naših rezultatov nismo ugotovili nobene povezave med padavinami in trajanjem snežne odeje na posameznih meteoroloških postajah. Če bi hoteli potrditi ali zavreči zgornjo trditev za Slovenijo, bi morali primerjati količino dežja in količino snega. Podatkov za količino snega v tem delu nismo statistično obdelali. Prelomna leta za temperaturo zraka in dolžino snežne odeje za celoletne podatke in za hladne polovice leta se za vse meteorološke postaje zelo dobro ujemajo.

Za nadaljnjo analizo bi lahko primerjali padavine in pretoke rek, za kar bi potrebovali gostejšo mrežo obdelanih meteoroloških in vodomernih postaj, ki bi jih primerjali po porečjih. Lahko bi tudi analizirali nekatere dodatne meteorološke spremenljivke, kot so zračni tlak, trajanje sončnega obsevanja in relativno vlažnost na meteoroloških postajah, zanimive rezultate pa bi nam najbrž dale tudi raziskave podzemnih voda in kraških jam.

6 SKLEPI

Rezultate časovne analize nekaterih klimatskih spremenljivk v Sloveniji lahko strnemo v nekaj glavnih spoznanj:

- Mann-Whitney-Pettit preizkus je ustrezna metoda za ugotavljanje prelomne točke in iskanje nehomogenosti v meteoroloških časovnih vrstah, arhivi meteoroloških, vodomernih in fenoloških postaj pa so nepopolni, kar otežuje homogenizacijo in ugotavljanje vzrokov za najdena prelomna leta.
- Pri podatkih za temperaturo zraka, trajanje snežne odeje in nastop fenoloških faz, je prišlo do prelomnega leta konec 80.let prejšnjega stoletja.
- Rezultati so potrdili, da višje temperature zraka v spomladanskem obdobju na območju zmernih geografskih širin vplivajo na zgodnejši fenološki razvoj rastlin, saj je prelomno leto za cvetenje breze in leske nastopilo približno eno leto po prelomnem letu za temperature zraka v zimskem in celoletnem obdobju.
- Podatki za hladne polovice let na vodomernih postajah kažejo na začetek upadanja povprečnega srednjega pretoka konec 60.let.
- Do naraščanja količine padavin je prišlo na meteorološki postaji Postojna po letu 1975, na treh drugih postajah (Kočevje, Slap pri Vipavi in Rateče) se je začelo

upadanje količine padavin v 70. letih, torej kasneje, kot se je začelo upadanje pretokov rek.

Vremenske razmere pozimi so odraz globalne cirkulacije, poleti pa je variabilnost večja zaradi lokalnih vplivov. Posledično se prelomna leta za hladno polovico leta za vse postaje dobro ujemajo, medtem ko so za toplo polovico leta razlike med njimi precejšnje. Za natančnejše rezultate bi potrebovali gostejši nabor merskih postaj in popolnejšo bazo metapodatkov, smiselno pa bi bilo analizirati še nekatere druge meteorološke spremenljivke kot npr. sončno obsevanje, zračni tlak in relativno zračno vlago.

7 VIRI

- Ahas, R. 1999. Long-term Phyto-, Ornitho- and Ichthyophenological Time-series Analyses in Estonia. *Int. J. Biometeorol.*, 42: 119–123.
- Bergant, K., Kajfež-Bogataj, L. 2005. N-PLS regression as empirical downscaling tool in climate change studies. *Theor. Appl. Climatol.*, 81: 11-23.
- 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. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 135 str.
- ARSO - Domača stran Agencije Republike Slovenije za okolje. 2004. Dostopno na naslovu <http://www.arso.gov.si/> (14. 02.2006).
- Houghton, J.T. (urednik) 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contribution Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press: 1-83.
- Kajfež-Bogataj, L. 2005. Podnebne spremembe in njihovi vplivi na kakovost življenja ljudi. *Acta agric. Slov.*, 85, 1: 41-54.
- Kiely, G. 1999. Climate Change in Ireland. From Precipitation and Streamflow Observations. *Advances in Water Resources*, 23: 141–151.
- Lanzante, J.R. 1996. Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data: Theory and examples, including applications to historical radiosonde station data. *International Journal of Climatology*, 16: 1197-1226.
- Lund, R., Reeves, J. 2002. Detection of Undocumented Change-points: A Revision of the Two-Phase Regression Model. *Journal of Climate*, 15: 2547-2554.
- Mantua, N.J. 2004. Methods for detecting regime shifts in large marine ecosystems: a review with approaches applied to North Pacific data. *Progress in Oceanography*, 60: 165-182.
- Mauget, S.A. 2003. Multidecadal regime shifts in US streamflow, precipitation, and temperature at the end of the twentieth century. *Journal of Climate*, 16: 3905-3916.
- Page, E.S. 1957. On problems in which a change in parameter occurs at an unknown point. *Biometrika*, 44: 248-252.
- Pettitt, A.N. 1980. A simple cumulative sum type statistic for the change-point problem with zero-one observations. *Biometrika*, 67, 1: 79-84.

- Pettit, A.N. 1979. A Non-parametric Approach to the Change-point Problem. *App. Statist.*, 28: 126–135.
- Schönwiese, C.D., Rapp, J. 1997. *Climate Trend Atlas of Europe Based on Observations 1891 – 1990*. Dordrecht (Netherlands): Kluwer academic publishers: 5–45.
- Shaban, S.A. 1980. Change point problem and two phase regression: An annotated bibliography. *Int. Statist. Rev.*, 48: 83-93.
- Siegel, S., Castellan, N.J. 1988. *Nonparametric Statistics for the Behavioural Sciences*. Second edition. McGraw-Hill publishing company: 395 str.
- Tomozeiu, R., Busuioc, A., Marletto, V., Zinoni, F., Cacciamani, C. 2000. Detection of changes in the summer precipitation time series of the region Emilia-Romagna, Italy, *Theoretical and Applied Climatology*, 67: 193-200.
- Woodward, W.A., Gray, H.L. 1993. Global warming and the problem of testing for trend in time-series data. *Journal of Climate*, 6: 953-962.