

Agrovoc descriptors: drought; precipitation; precipitation deficit; data collection; soil water; soil water deficit; groundwater; statistical data

Agris category code: P40; P10

COBISS code 1.01

Obraznava meteorološke suše z različnimi indikatorji

Andrej CEGLAR¹, Lučka KAJFEŽ-BOGATAJ²

Delo je prispelo 5. maja 2008; sprejeto 1. avgusta 2008

Received: May 5, 2008; accepted August 1, 2008.

IZVLEČEK

Meteorološko sušo pogosto označimo s sušnimi indeksi, ki so preprosti za uporabo, hkrati pa absorbirajo ogromne količine podatkov o količini padavin, temperaturi, vodnemu režimu v tleh, ... Za študijo meteorološke suše v Sloveniji smo uporabili dva tovrstna indeksa: standardiziran padavinski indeks – SPI ter Palmerjev indeks sušnosti – PDSI. SPI lahko izračunamo na različnih časovnih skalah, zaradi česar lahko bolje opredelimo začetek, trajanje ter intenziteto suše. Prilagodljiva časovna skala pri SPI nam lahko pomaga nadzirati sušo tudi v kmetijstvu in hidrološkem sistemu. Primerjava obeh indeksov na primeru izračuna za Ljubljano nam je pokazala, da se PDSI najboljše ujema z SPI na devet- ter dvanajst-mesečni časovni skali. Oba indeksa kažeta, da je bilo v Ljubljani po letu 1900 najbolj sušno leto 1946. S pomočjo SPI smo ugotovili tudi statistično značilno ($\alpha=0,05$) upadanje količine poletnih padavin v Ljubljani, Murški Soboti ter Biljah v obdobju 1971 – 2006 (postaje se nahajajo na klimatsko različnih območjih v Sloveniji). Analiza meteorološke suše v letu 2003 nam je pokazala, da je bil v vegetacijskem obdobju ekstremen primankljaj padavin prisoten na širšem območju Slovenije z izjemo skrajnega severozahodnega dela, kjer je bila količina padavin nadpovprečna. Leto 2003 je bilo pri nas eno izmed najbolj sušnih po letu 1950.

Ključne besede: meteorološka suša, standardiziran padavinski indeks, Palmerjev sušni indeks, padavine, Slovenija

ABSTRACT

ANALYSIS OF METEOROLOGICAL DROUGHT WITH DIFFERENT INDICATORS

Meteorological drought is often described in terms of drought indices, which are simple to use and simultaneously absorb great amount of precipitation data, temperature data, ground water content data, etc. Two of them were used in analysis of meteorological drought in Slovenia: standardised precipitation index – SPI and Palmer drought severity index – PDSI. SPI can be calculated on different time scales, which is better for determining drought onset, duration and intensity. SPI with its adjustable time scale can be useful tool to determine the effects of precipitation shortages to ground water level, river discharges and soil water content. The comparison of two indices in Ljubljana showed us good agreement between the PDSI and SPI

¹ univ. dipl. meteor., Biotehniška fakulteta, p.p. 2995, 1001 Ljubljana, andrej.ceglar@bf.uni-lj.si

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

on nine-month and twelve-month time scale. Both indices showed us that after 1900 Ljubljana experienced worst drought conditions in 1946. SPI on three months time scale showed us significant ($\alpha=0,05$) negative trend for summer precipitation (period 1961 - 2006) for stations Ljubljana, Murska Sobota and Bilje (they are located in three different climatic regions within Slovenia). Six months SPI for September 2003 indicated extreme precipitation deficiency in greater part of Slovenia (except northwest, where above average precipitation was measured). In 2003 Slovenia recorded its most severe drought conditions after 1950 in all agricultural parts.

Key words: meteorological drought, standardised precipitation index, Palmer drought severity index, precipitation, Slovenia

1 UVOD

Suša velja za enega izmed kompleksnejših naravnih pojavov; je normalna ter ponavljajoča značilnost v vseh podnebnih tipih, vendar je pri njenih lastnostih in vplivih zaznati precejšnjo regionalno variabilnost (Wilhite, 1999). Širok nabor področij, na katere vpliva suša, geografska raznolikost pojavljanja suše ter zahteve po zalogah vode, ki jih določamo sami, otežujejo oblikovanje ene same definicije suše. V splošnem zato obstajata dve vrsti definiranja suše; prva je pojmovna, druga pa operativna. Pojmovne definicije pomagajo ljudem razumeti pojem suše, operativne definicije suše pa pomagajo ljudem prepoznati začetek, konec, pogostost pojavljanja ter intenziteto suše. Slednje temeljijo predvsem na odstopanju količine padavin od dolgoletnega povprečja. V kmetijstvu pomagajo primerjati dnevno količino padavin z evapotranspiracijo, kar omogoča določevanje razmerja zmanjševanja vlažnosti v tleh, iz česar se nato sklepa na vpliv suše na samo rastlinje v različnih fazah razvoja.

Suša se v nekaterih pogledih razlikuje od drugih naravnih nevarnosti. Težko je ugotoviti začetek in konec, saj se posledice akumulirajo počasi skozi precejšnje časovno obdobje, vztraja pa lahko več let. V splošnem poznamo štiri vrste suš: meteorološka, kmetijska, hidrološka ter socialno-ekonomska suša. Meteorološka suša je odvisna izključno od stopnje suhosti (manj padavin od povprečja) ter trajanja obdobja brez padavin. Ponavadi je definirana s stopnjo primankljaja padavin (v primerjavi z neko normalno oz. povprečno vrednostjo) in trajanjem sušnega obdobja. Nekatero definicije identificirajo sušo glede na število dni, ko je količina padavin manjša od vnaprej določenega nivoja. V območjih, ki jih karakterizirajo sezonske padavine, je daljše obdobje brez padavin povsem nekaj normalnega, zato tam določevanje suše glede na število dni brez padavin nima smisla. Definicije kmetijske suše se nanašajo na situacije, ko je v tleh premalo vlage, da bi ta zadostila potrebam rastlin v ravnem obdobju. Poleg padavin je v tem primeru potrebno upoštevati še zaloge vode v tleh ter razliko med dejansko in potencialno evapotranspiracijo. Količina vode, ki jo rastlina potrebuje, je odvisna od vremenskih razmer (temperatura, relativna vlažnost), biološke sestave ter razvojne faze rastline ter od sestave tal, na katerih se ta rastlina nahaja. Ob pomanjkanju talnih (reke, jezera) in podtalnih vodnih zalog (podtalnica), govorimo o hidrološki suši, ki jo povzroči manjko padavin skozi daljše časovno obdobje. Pojavlja se na nekoliko daljši časovni skali, kot meteorološka ter kmetijska suša. Socialno-ekonomska suša se nanaša na stanje, ki nastane, ko pomanjkanje vode začne vplivati na ljudi in

njihov način življenja. Ta povezuje ekonomske standarde z elementi meteorološke, kmetijske in hidrološke suše. V večini primerov se zahteve po vodi večajo z naraščajočim številom prebivalstva in večjo potrošnjo. Pri ekonomsko socialni suši še posebej velja poudariti dejstvo: če se zahteve po vodi na določenem območju večajo hitreje, kot vodne zaloge to dopuščajo, bo sušni »udarec« toliko bolj značilen.

Meteorološko, kmetijsko ter hidrološko sušo pogosto opišemo s sušnimi indeksi, ki so zelo pripravni in preprosti za uporabo, hkrati pa absorbirajo ogromne količine podatkov o količini padavin, snežni odeji, vodnemu režimu v tleh itd. Obstaja mnogo različnih indeksov, ki merijo odstopanja padavin v določenem časovnem obdobju od povprečne vrednosti, ki pripada daljšemu obdobju v preteklosti. Najpogosteje uporabljen indeks na tem področju je standardiziran padavinski indeks - SPI (McKee s sod., 1993). SPI nam predstavlja, kaj določena količina padavin skozi neko časovno obdobje pomeni glede na normalno oz. pričakovano količino padavin za to obdobje. Edini vhodni podatek za njegov izračun predstavljajo padavine. Glavni prednosti tega indeksa sta njegova standardizirana narava in možnost izračuna na različnih časovnih skalah. To nam omogoča, da so frekvence sušnih dogodkov na katerikoli lokaciji ter na kakršnikoli časovni skali med seboj primerljive. SPI so uporabili za določevanje sušnih obdobjev že na Madžarskem (Szalai in Szinnel, 2000), kjer so ugotovili, da je indeks na različnih časovnih skalah sposoben identificirati vse vrste suš. Saunders in Hughes (2002) sta v svoji analizi ugotovila, da SPI prispeva k boljši prostorski standardizaciji, kot Palmerjev indeks sušnosti (Palmer, 1968). SPI na nacionalnem nivoju uporablja tudi NMDC (National Drought Mitigation Centre), v projektinih raziskavah pa so ga uspešno uporabili v Mehiki, Kostariki, Argentini, Čilu, Turčiji, na Madžarskem, Južni Afriki ter Keniji (NMDC, 2007). Splošna ugotovitev študije o sušah v Evropi (Lloyd-Hughes in Saunders, 2002) obsega dejstvo, da je SPI preprosto in učinkovito sredstvo za ugotavljanje suše v Evropi. Vogt in sod. (2000) ugotavlja, da je SPI vse bolj uporabljeno orodje v znanstvenih krogih.

Namen študije je uporabiti SPI za analizo meteorološke suše v Sloveniji. Za Ljubljano, ki ima nekoliko daljši niz meteoroloških podatkov, smo poleg SPI izračunali tudi Palmerjev indeks sušnosti (PDSI) ter ju med seboj primerjali. Analizirali smo meteorološko sušo v letu 2003 ter časovno vrsto SPI za poletne mesece na treh meteoroloških postajah v Sloveniji (Murska Sobota, Ljubljana ter Bilje). Tovrstna študija je tudi osnova za bolj obširno raziskavo o sušnem nadzoru nad območjem Slovenije ter jugovzhodne Evrope.

2 MATERIAL

Meteorološko sušo v Sloveniji smo analizirali z SPI, za Ljubljano pa smo izračunali še PDSI. Za izračun prvega potrebujemo čim daljši padavinski niz za določeno meteorološko postajo, pri drugem pa poleg padavin potrebujemo še temperaturo ter podatek o kapaciteti tal za zadrževanje rastlinam dostopne vode. Pri prostorski interpolaciji SPI smo uporabili 161 meteoroloških postaj v Sloveniji z zveznimi padavinskimi nizi za obdobje 1961 – 2006 (slika 1).



Slika 1: Lokacije meteoroloških postaj v Sloveniji, ki so bile izbrane za izračun SPI
Figure 1: Locations of meteorological stations in Slovenia, that were chosen for the calculation of SPI

Vse podatke in metapodatke smo dobili iz arhivov Urada za meteorologijo Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO). Za prostorsko interpolacijo SPI smo uporabili metodo splošnega kriginga z upoštevanjem nadmorske višine (Cressie, 1993), ki je implementirana v geostatističnem programskem paketu GSTAT. Nekoliko podrobnejšo analizo SPI ter PDSI smo naredili za Ljubljano, kjer so meritve padavin ter temperature prisotne od leta 1866 naprej.

3 METODE

Pri določevanju začetka, trajanja ter intenzitete suše si pomagamo s sušnimi indeksi. Sušni indeksi so ponavadi zvezna funkcija količine padavin, temperature ter vsebnosti vode v tleh. Največkrat so za izračun najbolj uporabni tisti indeksi, katerih vhodni podatki predstavljajo le padavine, saj imamo za te ponavadi dostopen dolg niz meritev. Samo podatki o količini padavin sami po sebi ne odražajo sušnih razmer najbolje, služijo pa kot strokovna rešitev na območjih, kjer drugih podatkov ni (Tate in Gustard, 2000).

3.1 STANDARDIZIRAN PADAVINSKI INDEKS (SPI)

SPI nam omogoča določevanje pogostosti ekstremno suših oz. ekstremno mokrih dogodkov na določeni časovni skali za katerokoli lokacijo, ki ima arhiviran padavinski niz podatkov. SPI je bil izpeljan z namenom, da bi lahko izmerili presežke oz. primankljaje padavin na različnih časovnih skalah. Različne časovne skale nam omogočajo določiti vpliv padavinskega primankljaja oz. presežka na razpoložljivost vodnih zalog pri različnih vodnih virih.

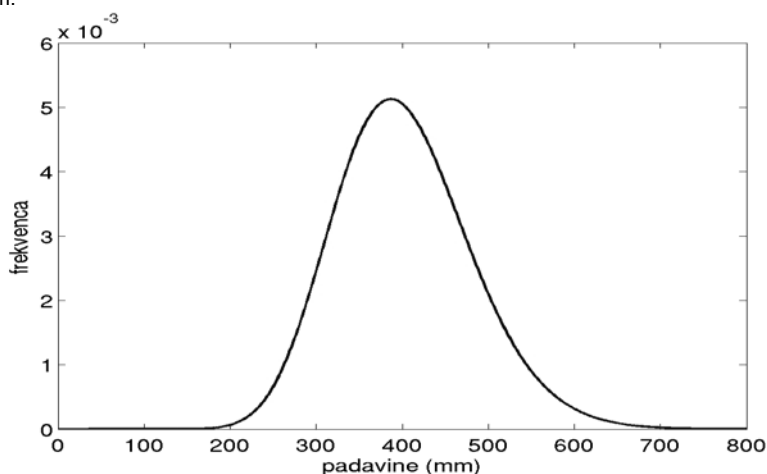
Thom (1966) je ugotovil, da se gama porazdelitev (1) dobro ujema s porazdelitvijo padavin v kalibracijskem obdobju. Porazdelitev gama definiramo s pomočjo frekvence oz. verjetnostne porazdelitvene funkcije kot:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \Rightarrow x > 0, \quad (1)$$

kjer parameter α predstavlja obliko porazdelitve, parameter β definira časovno skalo, x nam predstavlja količino padavin, $\Gamma(\alpha)$ pa je funkcija gama:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy. \quad (2)$$

Najprej je potrebno poiskati ustrezne parametre α in β tako, da se bo verjetnostna porazdelitvena funkcija (1) najbolje ujemala z porazdelitvijo padavin. Postopek iskanja parametrov α in β je podrobno opisan v članku »Some Methods of Climatological Analysis« (Thom, 1966). Slika 2 kaže primer frekvenčne porazdelitve poletnih padavin (enačba 1) za Ljubljano, s parametri $\alpha = 26$ ter $\beta = 16$. Maksimum porazdelitve se nahaja nekoliko pod 400 mm.



Slika 2: Porazdelitev količine poletnih padavin za Ljubljano, kalibracijsko obdobje 1961 - 2000
Figure 2: Frequency distribution of summer precipitation for Ljubljana, calibration period 1961 - 2000

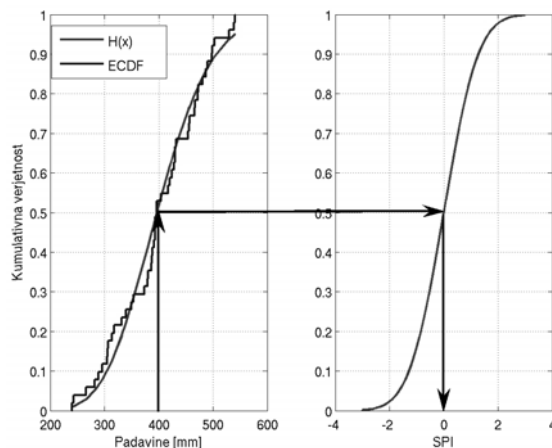
Z izračunanimi parametri določimo kumulativno verjetnost za opazovan padavinski dogodek (s količino padavin x) za določeno časovno skalo ter mesec v letu. Kumulativno verjetnost izračunamo kot:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx. \quad (3)$$

Ker gama porazdelitev ni definirana pri $x=0$ (v izbranem mesecu ni bilo padavin), kumulativno verjetnost zapišemo kot:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x), \quad (4)$$

kjer je q verjetnost, da ni padavin ($x=0$). Kumulativno verjetnost $H(x)$ je nato potrebno pretvoriti v standardizirano normalno naključno spremenljivko Z s povprečjem 0 ter varianco 1, kar je nato kar vrednost indeksa SPI. Pojemovno tako SPI predstavlja število standardnih odklonov padavinskega dogodka pod oz. nad povprečjem, kjer je SPI enak 0 (Panofsky in Brier, 1958). Uporaba metode je ilustrirana na sliki 3, kjer je prikazana transformacija padavinske porazdelitve s slike 2 (poletne padavine v Ljubljani, obdobje 1961 - 2000).



Slika 3: Pretvorba vsote poletnih padavin (v našem primeru 400 milimetrov) v vrednost indeksa SPI. Gladka krivulja na levem grafu $H(x)$ predstavlja izračunano kumulativno porazdelitev padavin, lomljena črta (ECDF) pa nam predstavlja empirično kumulativno porazdelitev.

Figure 3: Transformation of summer precipitation cumulative (400 millimeters in our case) into SPI. Smooth curve $H(x)$ on left graph represents derived cumulative precipitation distribution, graded line ECDF represents empirical cumulative distribution.

Na tej sliki torej vidimo transformacijo trimesečne vsote padavin (junij, julij, avgust) v vrednost SPI (s povprečjem 0 ter varianco 1). Lomljena črta na levem grafu predstavlja empirično kumulativno verjetnostno porazdelitev za omenjeno vsoto padavin za obdobje 1961 – 2000. Gladka krivulja na levem grafu predstavlja kumulativno verjetnostno porazdelitev $G(x)$, krivulja na desnem grafu pa kumulativno verjetnostno porazdelitev standardizirane normalne naključne spremenljivke Z . Vrednost SPI odčitamo na x osi na desnem grafu, kot kaže vrisana puščica (če npr. v poletnih mesecih skupno izmerimo 400 mm padavin, potem tej vrednosti po transformaciji pripada vrednost SPI okrog 0). Računski posotopek pretvorbe kumulativne verjetnostne porazdelitve $G(x)$ v standardizirano normalno spremenljivko Z je podrobneje opisan v članku »Accepting the standardised precipitation index: A calculation algorithm« (Guttman, 1999).

Že Tannehil (1947) je ugotovil, da majhna količina dežja v najbolj sušnem obdobju na določeni lokaciji lahko pomeni padavinsko obilje za drugo lokacijo. Akinremi s sod. (1996) je ugotovil, da glavni problem pri razvijanju primerne sušnega indeksa predstavljajo časovne in prostorske dimenzije suše; ne samo, da morajo biti padavinska odstopanja normalizirana glede na lokacijo, temveč morajo ta biti normalizirana tudi v času. Samo v tem primeru lahko indeks dobro opiše sušo. SPI izpolnjuje oboje; normaliziran je glede na lokacijo postaje, ker razloži frekvenčno porazdelitev padavin, ravno tako pa tudi spremljajočo variabilnost na sami postaji. Normaliziran pa je tudi v času, ker ga lahko izračunamo v kakršnem koli številu časovnih skal. Ne glede na lokacijo ter časovno skalo izračuna, SPI predstavlja kumulativno verjetnost glede na izbrano kalibracijsko obdobje, na osnovi katerega sta bila določena parametra gama porazdelitve. Preglednica 1 predstavlja vrednosti indeksa SPI ter pripadajočo sušno klasifikacijo s kumulativno verjetnostjo (ta je podana v procentih).

Hayes s sod. (1999) je ugotovil prednosti in slabosti uporabe SPI. SPI tri prednostne lastnosti:

1. Prva in glavna prednost je enostavnost uporabe tega indeksa. SPI temelji le na padavinskih nizih ter zahteva izračun samo dveh parametrov (PDSI npr. zahteva izračun 68 parametrov). Ker SPI ni odvisen od parametrov vlažnosti v tleh, ga lahko uporabimo za izračun v zimskem in poletnem času. Nanj ravno tako ne vpliva topografija.
2. Druga prednost je variabilna časovna skala izračuna; tako lahko opišemo sušne razmere v smislu meteorološke, kmetijske ter hidrološke uporabe. Tovrstni časovni značaj indeksa nam omogoča analizo sušne dinamike (določitev začetka ter konca suše).

3. Tretja prednost SPI izhaja iz njegove standardizirane narave. Ta nam omogoča, da so frekvence ekstremnih sušnih dogodkov na katerikoli lokaciji ter katerikoli časovni skali med seboj primerljive.

Po drugi strani pa ima SPI tri pomankljivosti:

1. Prva pomankljivost izhaja iz predpostavke, da obstaja primerna teoretična verjetnostna porazdelitev, s katero opišemo gole padavinske podatke; to seveda zahteva določeno količino kvalitetnih podatkov. McKee et al. (1993) predlagajo vsaj 30 letni padavinski niz za določitev parametrov gama porazdelitve.
2. Druga omejitev izhaja iz standardizirane narave indeksa; ekstremne suše (smatrano čez daljše obdobje) se bodo pojavljale z isto frekvenco na vseh lokacijah. SPI zato ni zmožen identificirati področij, ki so bolj »naklonjena« ekstremnim sušam od drugih.
3. Tretji problem se pojavi, ko uporabimo SPI na krajših časovnih skalah (1 mesec, 2 meseca) na območjih, kjer je sezonska količina padavin majhna. V tem primeru se lahko pojavijo zavajajoče visoke pozitivne ali negativne vrednosti indeksa SPI.

S standardiziranim padavinskim indeksom kot indikatorjem je določena operativna definicija suše. Posamezen sušni dogodek se začne, ko je vrednost SPI neprekinjeno negativna ter pade pod -1 in traja toliko časa, dokler se vrednost SPI v časovni vrsti zopet ne dvigne nad 0 (Wilhite, 1999). Intenziteta sušnega dogodka je določena z najnižjo doseženo vrednostjo indeksa v tem obdobju. Obseg suše pa je enolično določen kot vsota absolutnih vrednosti indeksa med trajajočim sušnim dogodkom (McKee s sod., 1993):

$$DM = - \left(\sum_{j=1}^x SPI_{ij} \right), \quad (5)$$

kjer se j začne s prvim sušnim mesecem ter konča ob koncu sušnega dogodka (x).

Preglednica 1: Klasifikacija suše ter pripadajoča verjetnost za pojav sušnega dogodka pri SPI
Table 1: Drought classification by SPI value and corresponding event probabilities

SPI	Klasifikacija	Verjetnost (%)
2,00 ali več	ekstremno mokro	2,3
1,50 do 1,99	zelo mokro	4,4
1,00 do 1,49	zmerno mokro	9,2
0 do 0,99	normalno	34,1
0 do -0,99	normalno	34,1
-1 do -1,49	zmerna suša	9,2
-1,50 do -1,99	huda suša	4,4
-2,00 ali manj	ekstremna suša	2,3

4.1 PALMERJEV INDEKS SUŠNOSTI (PDSI)

Izračun PDSI temelji na določeni zbirki empiričnih enačb, ki jih je izpeljal Palmer (1965). Indeks je bil vse od izpeljave eden najbolj uporabljenih sušnih indikatorjev v ZDA. PDSI predstavlja uteženo vsoto indikatorja trenutnega stanja vlažnosti ter vrednosti indeksa v prejšnjem časovnem koraku. Indikator trenutnega stanja vlažnosti zapišemo kot:

$$d = P - \hat{P}, \quad (6)$$

kjer P predstavlja mesečno vsoto padavin, \hat{P} pa je klimatsko utežena vsota mesečnih padavin (Palmer, 1965). S pomočjo \hat{P} zapišemo vodno bilančno enačbo:

$$\hat{P} = \overline{ET} + \overline{R} + \overline{RO} - \overline{L}, \quad (7)$$

kjer členi po vrsti predstavljajo povprečne vrednosti (za kalibracijsko periodo) evapotranspiracije (\overline{ET}), višine talnega vodnega rezervoarja \overline{R} , površinskega odtoka

(\overline{RO}) ter izgube vode iz tal (\overline{L}). V nadaljevanju postopka je treba najprej izračunati Palmerjev indeks stanja vlažnosti Z :

$$Z = K \cdot d, \quad (8)$$

kjer parameter K igra vlogo klimatske uteži in je uporabljen z namenom primerljivosti indeksa v prostoru in času. PDSI za i -ti mesec je potem definiran kot:

$$PDSI_i = 0.897 \cdot PDSI_{i-1} + \frac{Z_i}{3}. \quad (9)$$

Tako dobljeno vrednost PDSI potem primerjamo z intervali, kot so prikazani v preglednici 2, in določimo primerno sušno klasifikacijo.

Osnovna prednost PDSI je njegova standardizirana narava (Lloyd-Hughes B. in Saunders M. A., 2002), ki nam olajša kvantitativno primerjavo nastopa suše na različnih krajih ter časih.

Pri izračunu smo uporabili kalibrirano verzijo PDSI, ki izračuna klimatske uteži za vsako lokacijo posebej. V prvotni verziji (Palmer, 1965) so bili ti koeficienti zaradi računske zahtevnosti ter nerazvite računalniške tehnologije, določeni za omejeno območje v ZDA, zato so bili rezultati izračuna vprašljivi za ostale predele sveta (Alley, 1984).

Preglednica 2: Klasifikacija suše pri PDSI

Table 2: Drought classification by PDSI value and corresponding event probabilities

PDSI	Klasifikacija
4,00 ali več	ekstremno mokro
3,00 do 3,99	zelo mokro
2,00 do 2,99	zmerno mokro
1,00 do 1,99	neznatno mokro
0,50 do 0,99	začetek mokrega obdobja
0,49 do -0,49	normalno
-0,50 do -0,99	začetek suhega obdobja
-1,00 do -1,99	mila suša
-2,00 do -2,99	zmerna suša
-3,00 do -3,99	huda suša
-4,00 ali manj	ekstremna suša

4 REZULTATI Z RAZPRAVO

4.1 Meteorološka suša v Ljubljani

Pri izračunu indeksov za Ljubljano smo uporabili niza padavinskih ter temperaturnih podatkov, ki se začeta leta z letom 1900. Za izračun parametrov gama porazdelitve (enačba 1) smo uporabili kalibracijsko obdobje od leta 1901 do 2000. SPI smo izračunali na štirih časovnih skalah (tri-, šest-, devet- ter dvanajstmesečno), vrednosti pa so skupaj s PDSI prikazane na sliki 7. Ekstremno sušni ter mokri dogodki so pri obeh indeksih osenčeni.

SPI na tri- ter šest-mesečni časovni skali kaže nekoliko večjo variabilnost, kot na daljših časovnih skalah. Na sliki 7 vidimo, da na daljših časovnih skalah postanejo suše manj pogoste, vendar te trajajo dlje. SPI je precej močno koreliran z PDSI, predvsem na daljših časovnih skalah (preglednica 3); korelacija je največja med SPI na devet- ter dvanajst-mesečni časovni skali ($r=0,76$), kar se dobro ujema z rezultati,

ki jih je objavil Bussay s sod. (1998) za Madžarsko. SPI na trimesečni časovni skali pojasni preko 50 % variabilnosti SPI na šestmesečni časovni skali ter okrog 45 % variabilnosti PDSI. SPI na letni časovni skali pojasni okrog 56 % variabilnosti SPI na dvoletni časovni skali ter 58 % variabilnosti PDSI. Največja korelacija med SPI na devet- oz. dvanajst-mesečni skali s Palmerjevim indeksom je vidna tudi na sliki 7.

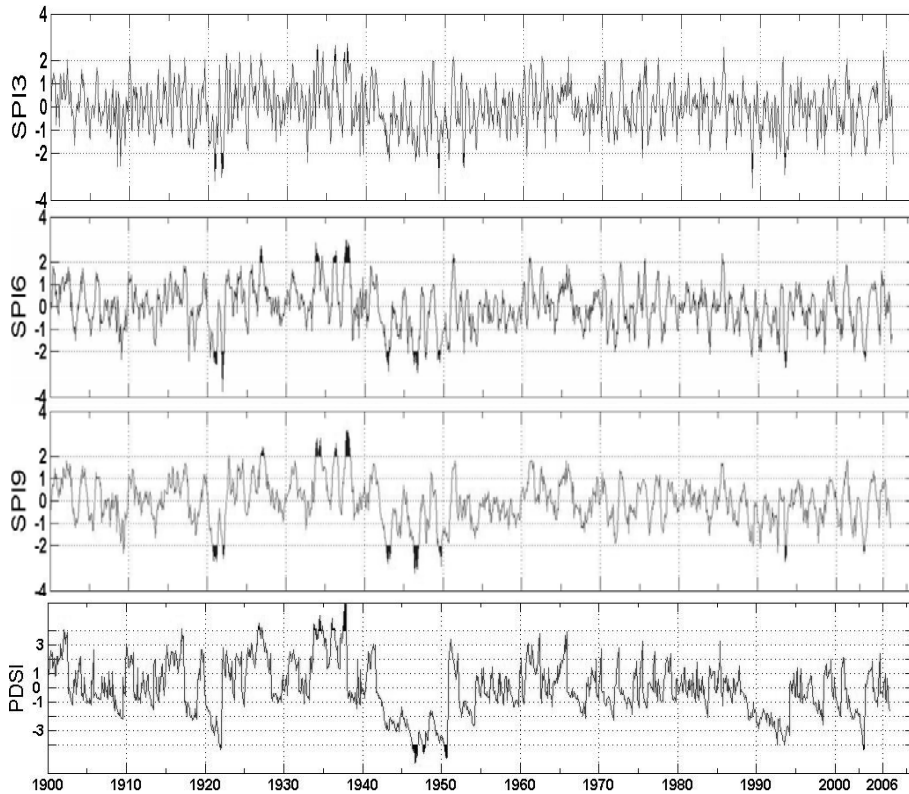
Preglednica 3: Korelacijski koeficienti med SPI3 – SPI 24 ter PDSI za Ljubljano
Table 3: Cross-Correlation between SPI3 – SPI24 and PDSI for Ljubljana

	SPI1	SPI3	SPI6	SPI9	SPI12	SPI24	PDSI
SPI1	1	0,55	0,39	0,32	0,30	0,22	0,47
SPI3		1	0,71	0,58	0,53	0,40	0,67
SPI6			1	0,82	0,72	0,56	0,75
SPI9				1	0,88	0,66	0,76
SPI12					1	0,75	0,76
SPI24						1	0,70
PDSI							1

Pri PDSI v splošnem ni zaznati tako velike variabilnosti, kot pri SPI (na krajših časovnih skalah). Na posameznih sušnih dogodkih, ki so opisani v nadaljevanju, lahko vidimo, da ima PDSI večji »spomin«, torej bolje opiše dogodke na daljši, kot na krajši časovni skali (to smo videli že pri korelacijskih koeficientih). PDSI ima »vgrajen« časovni korak devetih mesecev (Trnka, 2003), zato lahko razliko med SPI na devetmesečni časovni skali ter PDSI razložimo z upoštevanjem tal ter vodne bilance v izračunu PDSI. To je tudi razlog za manjšo variabilnost PDSI, saj lahko zaloga vode v tleh odloži začetek suše, ravno tako pa lahko tudi ublaži sam padavinski primankljaj, če ta ni prevelik in ne traja predolgo. Po daljšem padavinskem primankljaju PDSI ponavadi nekoliko kasneje konča sušno obdobje, saj izsušena tla potrebujejo nekaj časa za vzpostavitev vodnih zalog v talnem vodnem rezervoarju. Med sušnim obdobjem manjši padavinski skoki, ki jih zaznamo pri SPI na krajših časovnih skalah, ne pomenijo nujno bistvenega izboljšanja sušne situacije na daljši časovni skali. Tipičen primer te vrste vidimo ob koncu osemdesetih ter začetku devetdesetih let. V začetku leta 1989 je zelo ekstremen padavinski primankljaj povzročil začetek suše na daljši časovni skali. Padavinski primankljaj se je v naslednjih nekaj letih večal (SPI9 ter SPI12 sta bila večino časa negativna), zato je stalno upadal tudi PDSI. Tudi po ekstremnih padavinah ob koncu leta 1992 se je PDSI le malo povečal; znatno povečanje je videti šele v aprilu leta 1994.

Pred letom 1950 nam SPI na letni časovni skali kaže na 4 ekstremno sušne ter 4 ekstremno mokre dogodke. Ekstremna suša se je najprej začela konec leta 1920 ter se nadaljevala do septembra 1922 (SPI12 postane pozitiven). Podobno nam na ekstremno sušo kaže Palmerjev indeks, ki se marca v letu 1922 strmo dvigne, kar naznanja konec suše nekoliko prej kot SPI12. Ravno v tem obdobju je suša vztrajala na širšem območju Slovenije (Trontelj, 1997), v Ljubljani je padlo samo 850 milimetrov padavin. Sušam je sledilo nekoliko bolj mokro obdobje, kjer nam SPI12 kaže na ekstremno mokre dogodke v letih 1927, 1933 ter 1937. V letu 1933 je v

Ljubljani padlo kar 2003 milimetrov, v letu 1937 pa 2379 milimetrov padavin. V letu 1933 so na Barju imeli poplavo (v septembru), ravno tako pa je poplavljala tudi Ljubljana (Trontelj, 1997). Sledilo je obdobje suš; ekstremni primankljaj padavin na letni časovni skali (SPI12) smo zabeležili v letih 1943, 1947 ter 1949, suša pa je vztrajala kar od leta 1942 do konca leta 1950. Podobno nam kaže tudi PDSI, kjer se dobro vidi, da je v tem obdobju suša vztrajala najdlje v zadnjih 100 letih. O sušah v letih 1942, 1943, 1946 ter 1949 poroča tudi Trontelj (1997). Kobold (2002) pravi, da je za Ljubljano (meritev gladine v Mostah) v neprekinjenem obdobju opazovanj najbolj suho bilo leto 1947 (SPI12 ter PDSI sta v tem obdobju dosegla najmanjšo vrednost v prejšnjem stoletju).



Slika 7: Vrednosti SPI na tri-, šest-, devet- ter dvanajstmesečni časovni skali ter PDSI za Ljubljano (obdobje 1900 – 2006)

Figure 7: Drought severity index values representative of Ljubljana for the period 1900 to 2006

Po letu 1950 nam SPI12 ne kaže več ekstremnih sušnih dogodkov v Ljubljani, opaziti pa je nekoliko pogostejše pojavljanje ekstremne suše na krajših časovnih skalah (SPI3, SPI6). Najnižjo vrednost indeksa opazimo pri SPI na trimesečni skali v januarju 1989, ko je od novembra v prejšnjem letu do januarja padlo le 60 mm padavin. O suhi, topli in izredno sončni zimi 1989/90 piše tudi Trontelj (1997). Sušni dogodki so bili pogostejši po letu 1990, predvsem na krajših časovnih skalah. Padeč PDSI je zaznati v začetku devetdesetih let, z najintenzivnejšo sušo v letu

1993. Takrat je dosegel ekstremno vrednost tudi SPI na eno-, tro-, -šest ter devet-mesečni skali. V zimi 1992/93 poročajo o ekstremni suši, ki se je nadaljevala do konca poletja (Trontelj, 1997). Oba indeksa (SPI na vseh časovnih skalah ter PDSI) kažeta na ekstremno sušo tudi v letu 2003; ta je bila v kmetijskem pogledu ena izmed najhujših v zadnjih 50 letih (Kajfež-Bogataj, 2005).

Preglednica 4 predstavlja najnižje vrednosti SPI na vseh časovnih skalah. Na mesečni časovni skali je dosegel najnižjo vrednost novembra 1924, ko je v Ljubljani padel le 1 milimeter padavin. Trimesečna vsota padavin za april (vsota februarških, marčevskih ter aprilskih) je bila najmanjša v letu 1949, ko je od marca do aprila padlo le 28 milimetrov padavin. Dvanajstmesečna vsota padavin za september je bila najmanjša leta 1946, ko je od oktobra 1945 do septembra naslednje leto padlo le 615 milimetrov padavin.

Preglednica 4: Najnižje dosežene vrednosti SPI na različnih časovnih skalah v obdobju 1900 – 2006 (kalibracijsko obdobje za izračun SPI je 1901 – 2000). Poleg indeksa so še ustrezne vsote padavin za pripadajočo časovno skalo.

Table 4: Lowest values of SPI on different time scales for a period 1900 – 2006 (calibration period for SPI calculation is 1901 – 2000). Beside index values there are precipitation sums, belonging to time scale of SPI.

	Datum	Vrednost	Vsota padavin (mm)
SPI1	1924, november	-4,24	1
SPI3	1949, april	-3,73	28
SPI6	1921, december	-3,76	277
SPI9	1946, junij	-3,21	508
SPI12	1946, september	-3,49	615
SPI24	1921, december	-3,19	1781

4.3 Analiza količine poletnih padavin z SPI

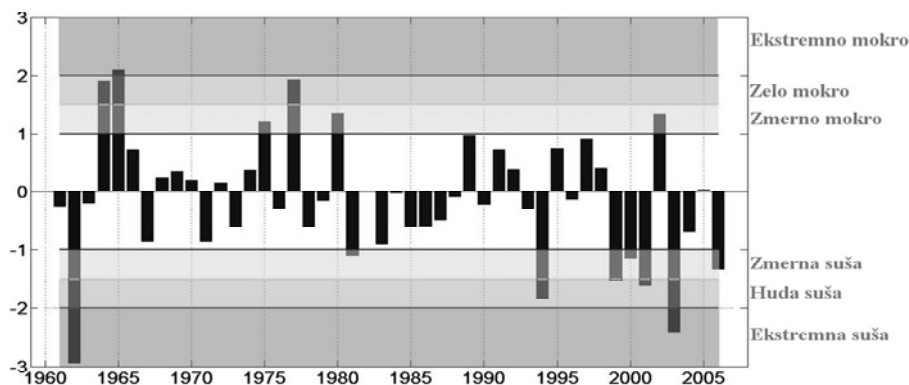
Trimesečni SPI za avgust primerja padavinsko vsoto za mesece junij, julij ter avgust v posameznih letih z isto trimesečno vsoto za vsa leta v kalibracijski periodi. Lahko bi rekli, da nam avgustovski trimesečni SPI govori o primankljaju oz. presežku poletnih padavin. Analizo tega parametra smo naredili za postaje Bilje, Ljubljano in Mursko Soboto.

Na sliki 8 je prikazana časovna vrsta tri-mesečnega SPI za mesec avgust za postajo Bilje. V Biljah smo imeli največji primankljaj padavin v poletju 1962, ko je vrednost indeksa padla kar krepko pod -2. V tem letu je padlo v poletju le 131 milimetrov padavin (v avgustu padavin ni bilo). Ekstremno sušno je bilo tudi poletje 2003, ko je padlo 162 mm padavin, medtem ko povprečna količina poletnih padavin v kalibracijskem obdobju znaša 360 milimetrov. Od leta 1998 naprej je z izjemo leta 2002 opaziti občutno bolj sušna poletja.

V Ljubljani so bila v obdobju od 1961 do 2006 kar štiri poletja ekstremno sušna (slika 9). Največji primankljaj padavin smo imeli v letu 2001, ko je poleti padlo le 228 milimetrov padavin, medtem ko povprečna količina padavin v kalibracijskem obdobju znaša 409 milimetrov. Ekstremno sušno je bilo tudi poletje 1992, ko je padlo 240 milimetrov padavin. Ekstremne primankljaje smo zabeležili še v letih 1983 ter 2003.

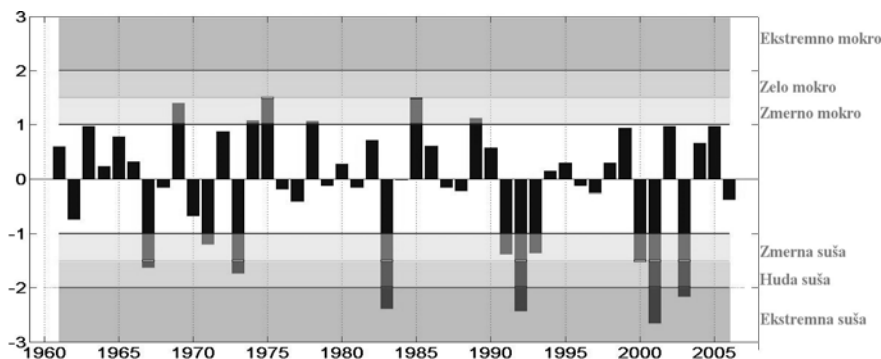
Tudi v Murski Soboti so poletja v zadnjih 15 letih v povprečju bolj sušna (slika 10). Izstopajo poletja v letih 1992, 2000 ter 2003. Največji primankljaj padavin je opaziti v poletju 1992, ko je padlo le 137 milimetrov padavin (povprečna količina poletnih padavin za Mursko Soboto znaša 296 milimetrov).

Na vseh treh postajah je opaziti statistično značilen upad količine poletnih padavin v obdobju 1971 – 2006 (ARSO, 2007). Pri stopnji tveganja 5 % lahko trdimo, da smo na vseh treh postajah opazili tudi statistično značilen upad trimesečnega SPI za avgust. Trend je najbolj negativen v Ljubljani.



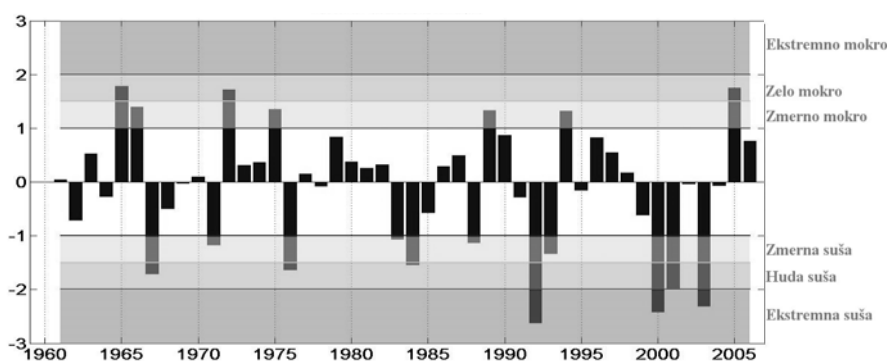
Slika 8: Trimesečni SPI za mesec avgust ter postajo Bilje.

Figure 8: Three month august SPI for station Bilje.



Slika 9: Trimesečni SPI za mesec avgust ter postajo Ljubljana.

Figure 9: Three month august SPI for station Ljubljana.



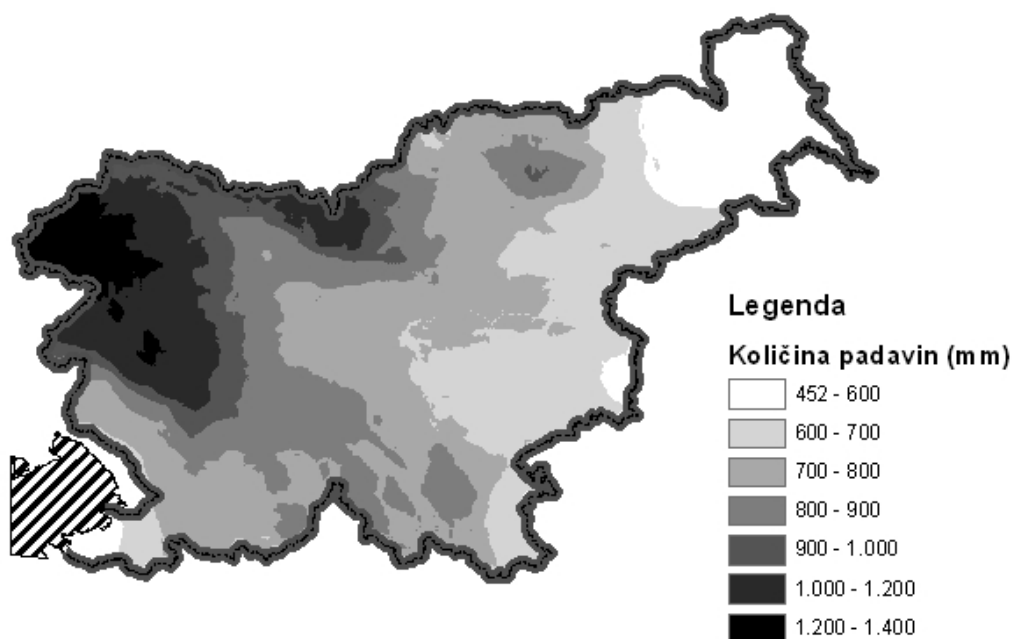
Slika 10: Trimesečni SPI za mesec avgust ter postajo Murska Sobota.

Figure 10: Three month august SPI for station Murska.

4.4 Meteorološka suša v Sloveniji v letu 2003

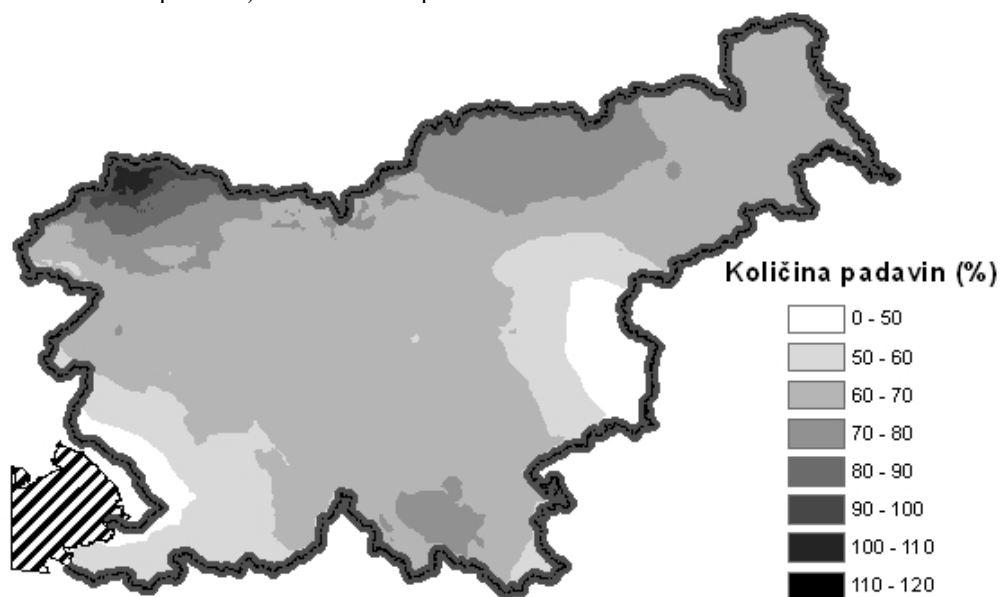
Prostorska porazdelitev vrednosti indeksa SPI je močno povezana s količino padlih padavin v določenem časovnem obdobju. Sama prostorska porazdelitev padavin v Sloveniji je povezana z njenim razgibanim reliefom. Orografski učinek povzroči povečanje količine padavin, ko gremo z morja proti notranjosti Slovenije, maksimalna pa je količina padavin ob Dinarsko-Alpski pregradi. Tako se ob obali letna količina padavin giblje med 1100 ter 1200 milimetri, v Julijskih Alpah pa pade letno tudi do 3200 milimetrov padavin. Letna količina padavin se močno zniža proti severovzhodu države, kjer ta ponavadi ne preseže 900 milimetrov. Primankljaj padavin na severovzhodu države tako pomeni povsem nekaj drugega kot enak primankljaj v goratih predelih zahodne Slovenije. Zaradi majhne količine padavin v severovzhodnem delu Slovenije ter na Primorskem se suše tam pojavljajo pogosteje. SPI je v tem pogledu dobro orodje za oceno meteorološke suše, saj nam opiše primankljaj oz. presežek padavin glede na povprečno vrednost na določenem območju. V smislu sušne intenzitete lahko zato primerjamo padavinski primankljaj na dveh območjih, ki imata povsem drugačne padavinske lastnosti. Koncept SPI je podoben sliki razlike med dejansko količino padavin ter povprečno količino padavin, njegova informacija pa podaja tudi statistično velikost odstopanja od povprečnih padavin in tako bolje prikaže resnost padavinskega primankljaja.

Analiza meteorološke suše v letu 2003 nam je pokazala ekstremne padavinske razmere v večjem delu Slovenije. Sliki 11 in 12 nam kažeta povprečno količino padavin v vegetacijski dobi (april - september) za obdobje 1961 – 2000 ter odstopanje količine padavin od povprečja v letu 2003. Tedaj je bila količina padavin v širšem območju Slovenije precej pod povprečjem, razen v skrajnem severozahodnem delu, kjer so namerili nadpovprečno količino padavin. Najbolj očitno odstopanje od povprečja je vidno v vzhodnem delu Slovenije (tam je padlo le nekaj nad 200 milimetri padavin), velik padavinski primankljaj pa je opazen tudi v severovzhodnem delu ter na Primorskem.



Slika 11: Povprečna količina padavin (v milimetrih) v vegetacijski dobi (april – september) za obdobje 1961 – 2000.

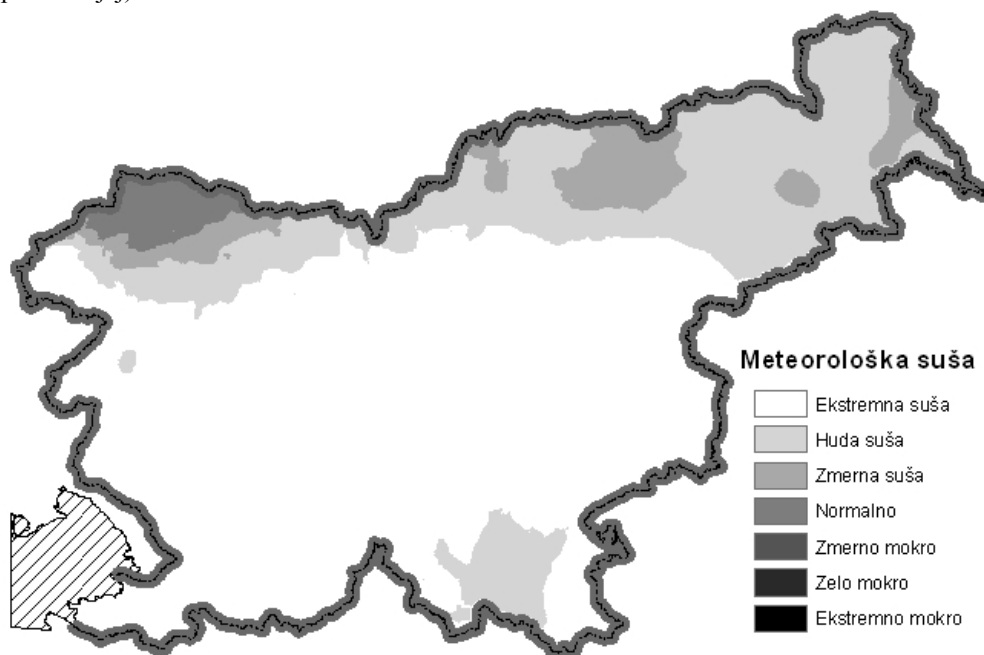
Figure 11: Average precipitation (in millimeters) in vegetation period (april – september) for calibration period 1961 – 2000.



Slika 12: Količina padavin v vegetacijski dobi leta 2003 v primerjavi s povprečjem obdobja 1961 – 2000.

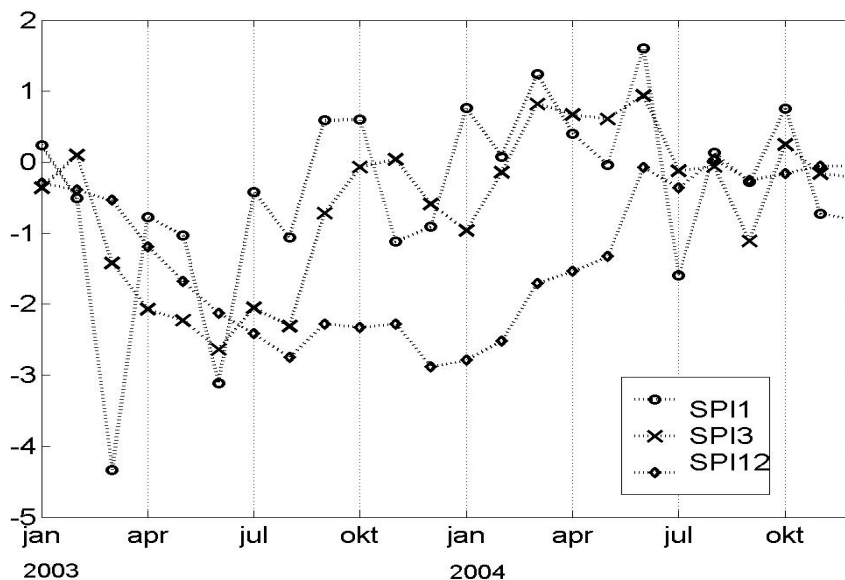
Figure 12: Precipitation amount in vegetation period 2003 compared with 1961 – 2000 normals.

Sliki odstopanja padavin je zelo podobna prostorka interpolacija šestmesečnega SPI (slika 13) za september v letu 2003. Z izjemo Zgornjesavske doline in nekaterih predelov Koroške ter severovzhodne Slovenije, je vegetacijsko obdobje v večjem delu države zaznamovala ekstremna meteorološka suša (ekstremni padavinski primankljaj).



Slika 13: Šestmesečni SPI za september 2003, kalibracijsko obdobje 1961 - 2000
Figure 13: Six month SPI for september 2003, calibration period 1961 – 2000

Razvoj meteorološke suše na različnih časovnih skalah v Murski Soboti je prikazan na sliki 14. Suša se je začela že v marcu 2003, ko je SPI na mesečni skali dosegel ekstremno negativno vrednost. V marcu je padlo le 1,5 milimetra padavin (najbolj suh marec po letu 1961). Suša se je na mesečni skali nadaljevala vse do oktobra, ko je indeks dosegel pozitivno vrednost. Poleg marca je bil ekstremno sušen še junij. Na trimesečni skali je suša vztrajala vse od marca do novembra, ekstremen primankljaj pa je viden od aprila do septembra. Na letni časovni skali (SPI12) je indeks postal negativen že novembra v letu 2001; ta suša trajala vse do avgusta v letu 2004, z ekstremnimi primankljaji od junija 2003 do aprila 2004; dolgoročno je torej meteorološka suša vztrajala več let, kar je v veliki meri vplivalo tudi na kmetijski pridelek v regiji. Vodni primankljaj je močno prizadel ozimna žita, koruzo ter travno rušo, ravno tako pa je škodoval tudi sadnemu drevju (ARSO, 2007).



Slika 14: SPI na mesečni, trimesečni ter letni časovni skali za Mursko Soboto
 Figure 14: SPI on different time scales for Murska Sobota

6 SKLEPI

V delu smo predstavili dva sušna indeksa (SPI ter PDSI) za določevanje začetka, trajanja ter intenzitete suše. SPI lahko izračunamo na različnih časovnih skalah, kar nam omogoča boljši nadzor nad sušo, natančnejšo določitev začetka ter trajanja suše. Poleg tega pri SPI kot vhodni podatek potrebujemo le padavinski niz, pri PDSI pa poleg padavin potrebujemo še temperaturni niz ter podatek o kapaciteti tal za zadrževanje rastlinam dostopne vode.

Primerjava SPI na različnih časovnih skalah ter PDSI za Ljubljano je pokazala, da se slednji najboljše ujema z SPI na devet- ter dvanajst-mesečni časovni skali. PDSI ima v primerjavi z SPI krajši odziv na padavinska odstopanja in se v splošnem obnaša bolj stabilno, kar se ujema tudi z rezultati madžarske študije (Szalai, Szinell, 2000). Počasnejši odziv bi lahko povzročil težave pri določevanju začetka ter konca sušnega dogodka. SPI je z možnostjo izračuna na večih časovnih skalah boljše orodje za karakterizacijo sušnega dogodka. Prilagodljiva časovna skala pri SPI bi nam lahko pomagala nadzirati sušo tudi v kmetijstvu in hidrološkem sistemu (kmetijske rastline se odzovejo že na krajše, hidrološki sistem pa na daljše pomanjkanje padavin). V splošnem smo videli, da je odziv SPI na padavinske razmere na daljši časovni skali počasnejši.

Analiza količine poletnih padavin z SPI nam je pokazala, da je količina poletnih padavin v Ljubljani, Biljah ter Murski Soboti v upadanju. Opaziti je vse več

ekstremno sušnih poletij, predvsem v Ljubljani, kjer je upad poletnega SPI za avgust tudi najbolj izrazit. Po letu 1990 so bila na vseh omenjenih postajah najbolj izrazito sušna poletja 1993, 2000, 2001 ter 2003.

Analiza meteorološke suše v letu 2003 nam je pokazala ekstremni primankljaj padavin v vegetacijskem obdobju v večjem delu Slovenije z izjemo severozahodnega dela; v večjem delu Slovenije je padlo le med 40 % ter 70 % dolgoletne povprečne količine padavin. Poleg ekstremne meteorološke suše je bila tudi kmetijska suša v letu 2003 ena izmed najhujših v zadnjih 50 letih (Kajfež-Bogataj, 2005). K kmetijski suši so prispevale tudi ekstremno visoke temperature, ki so povzročile intenzivnejše izhlapevanje. Za nadziranje kmetijske suše bi bilo zato potrebno med seboj primerjati več sušnih indeksov, ki poleg padavin upoštevajo tudi evapotranspiracijo.

Oba indeksa bo potrebno primerjati z merjenimi pretoki rek, globino podtalnice, vlažnostjo tal ter kmetijskim pridelkom. S tem bomo lahko ugotovili, na kateri časovni skali se SPI najboljše ujema s posameznimi parametri, poleg tega pa tudi morebitno ujemanje PDSI z naštetimi parametri.

7 VIRI

- Akinremi, O. O., McGinn, S. M., Barr. A. G., 1996. Evaluation of the Palmer Drought Index on the Canadian Prairies. *Journal of Climate* 9:897-905.
- Alley, W.M. 1984. The Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23:1100-1109.
- ARSO - Domača stran Agencije Republike Slovenije za okolje. 2007. Dostopno na naslovu <http://www.arso.gov.si/> (27. 10. 2007).
- Bussay AM, Szinell C, Hayes M, Svoboda M. 1998. Monitoring drought in Hungary using the standardized precipitation index. *Annales Geophysicae, Supplement 11 to Vol 16, the Abstract Book of 23rd EGS General Assembly, C450. April 1998, Nice; France.*
- Bussay A, Szinell C, Szentimery T. 1999. Investigation and Measurements of Droughts in Hungary. *Hungarian Meteorological Service: Budapest.*
- Cressie, N. A. C. 1993. *Statistics for spatial data.* Wiley series in probability and mathematical statistics. Applied probability and statistics section. Str. 211 – 275.
- Guttman, N. B. 1999. Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. *J. Am. Water Resources Assoc.* 35: 311-322

- Hayes MJ, Svoboda MD, Wilhite DA, Vanyarkho OV. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80: 429–438.
- Kajfež-Bogataj, L., Bergant, K., 2005. Podnebne spremembe v Sloveniji in suša = Climate change and drought in Slovenia. *Ujma (Ljublj.)*, 2005, št. 19, str. 37-41.
- Kobold, M., 2003. Hidrološka suša slovenskih vodotokov v obdobju 2000-2002 = Effects of drought on Slovenian rivers from 2000-2002. *Ujma (Ljublj.)*, 2003/2004, št. 17/18, str. 102-111, ilustr.
- Lloyd-Hughes, B., Saunders, A. M., 2002. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology* 22. 1571 - 1592
- McKee TB, Doesken NJ, Kliest J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17–22 January, Anaheim, CA. American Meteorological Society: Boston, MA; 179–184.
- NDMC – Domača stran National Drought Mitigation Center. 2007. Dostopno na naslovu <http://drought.unl.edu/> (15. 10.2007).
- Palmer, W. C. 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. *Weatherwise* 21(4):156-161.
- Panofsky, H.A., and Brier, G.W., 1958, Some applications of statistics to meteorology: The Pennsylvania State University Press, 224 p.
- Szalai S, Szinell C. 2000. Comparison of two drought indices for drought monitoring in Hungary - a case study. In *Drought and Drought Mitigation in Europe*, Vogt J.V., Somma F (eds). Kluwer: Dordrecht; 161-166
- Tannehil, I. R., 1947. *Drought, Its Causes and Effects*. Princeton University Press. 264 p. quoted from WMO (1975)
- Tate, E. L., Gustard, A., 2000. Drought definition: a hydrological perspective. In *Drought and Drought Mitigation in Europe*, Vogt J.V., Somma F. (eds). Kluwer: Dordrecht; 23-48
- Thom, Herbert C. S. *Some Methods of Climatological Analysis*. World Meteorological Organization Technical Note No. 81, Geneva, Switzerland, 1966, 43 pp.
- Trnka, M., Semerádova, D., Eitzinger, J., Dubrovsky, M., Wilhite, D., Svoboda, M., Hayes, M., Žalud, Z., 2003. v: XI. International poster day ("Transport of water, chemicals and energy in soil-crop-atmosphere system"), Bratislava, Hidrološki inštitut, Slovaška akademija znanosti, Slovaška.
- Trontelj, M., 1997. *Kronika izrednih vremenskih dogodkov XX. Stoletja*. Hidrometeorološki zavod RS. Ljubljana, 1997.

Vogt, J. V., Niemeier, S., Soma, F., 2000. Drought monitoring from space. In Drought and Drought mitigation in Europe, Vogt J.V., Somma F. (eds). Kluwer: Dordrecht; 167-183.