

Andrej DRAKSLER*

dr. Peter FRANTAR**

Vlado SAVIČ**

INDEKS SGI – KAZALNIK HIDROLOŠKE SUŠE PODZEMNIH VODA

POVZETEK

Na Agenciji za okolje smo za kazalnik hidrološke suše podzemnih voda uporabili standardizirani indeks gladine podzemne vode (Standardised Groundwater level index – SGI). SGI je normaliziran indeks, kjer je umerjanje izvedeno na mesečni ravni za vsak mesec posebej, pri čimer so upoštevane sezonske razlike. Mesečne časovne vrste so transformirane v normalno porazdelitev, ocenjene standardizirane vrednosti predstavljajo končne vrednosti indeksa SGI. Iz vrednosti indeksa SGI smo razbrali nekatere značilnosti, ki se pojavljajo na več vodomernih postajah hkrati v daljšem časovnem obdobju (npr. več zaporednih let z nizkimi gladinami). Za neposredno primerjavo med postajami je indeks izračunan na podlagi enakega obdobja. Uporabili smo podatkovne nize nivojev podzemne vode v obdobju 1981–2010. Indeks SGI je izračunan za 95 vodomernih postaj na podzemnih vodah. Mesečne vrednosti indeksa SGI smo združili v celoten niz ter tako dobili standardizirane prikaze gladine podzemne vode za obdobje 1981–2010. Opravili smo analizo indeksov SGI po dekadah 1981–1990, 1991–2000 in 2001–2010. Analizo smo izvedli v okviru projekta Ocena podnebnih sprememb v 21. stoletju, ki ga skupaj z Ministrstvom za okolje izvaja Agencija RS za okolje.

UVOD

Hidrološka suša je definirana kot propagacija, stopnjevanje vpliva meteorološke suše na zemeljski vodni krog in je odvisna od značilnosti vodnega kroga (Van Loon et al., 2015 po Dracup et al., 1980; Woo and Tariule, 1994; Shiau and Shen, 2001; Kim et al., 2003; Hisdal et al., 2004; Mishra et al., 2009; Wong et al., 2013). Zmanjšanje razpoložljivih količin podzemne vode lahko opredeljujemo tudi kot hidrološko sušo v vodonosniku, ki se ocenjuje kot nizko vodno stanje s pomočjo statistične metode analize vodostajev na merilni mreži Agencije RS za okolje. Analiza dolgoletnih nizov meritev gladin podzemne vode omogoča določitev sušnih gladin (kazalec SGI) na posameznih merilnih mestih. Cilj analize je izračunati zanesljiv indeks za spremljanje gladine podzemne vode, ki se lahko uporablja na različnih vodomernih postajah na različnih vodonosnikih in omogoča medsebojno primerjavo. V našem primeru vodonosnike pojmuje kot dele vodnih teles podzemnih voda.

INDEKS SGI

Standardizirani indeks gladine podzemne vode (Standardised Groundwater level index – SGI), ki izhaja iz Standardiziranega padavinskega indeksa (Standardised Precipitation index – SPI po WMO, 2012), je primeren za monitoring in analize sušnih stanj podzemnih voda (Bloomfield, Marchant, 2013). Umerjanje indeksa je izvedeno na mesečni ravni, za vsak mesec posebej, da so upoštevane sezonske razlike. Spremenljivka nivo podzemne vode po mesecih se ne porazdeljuje normalno, zato je izvedena normalizacija: mesečne časovne vrste so transformirane v normalno porazdelitev – indeks SGI je torej normaliziran indeks. Ob koncu so ocenjene standardizirane vrednosti, ki predstavljajo končne vrednosti indeksa SGI. Intenzivnost suše se razbere iz vrednosti indeksa SGI in je določena na podlagi razredov (Tabela 1). Vrednost SGI = 0 pomeni srednje stanje gladine podzemne vode, bolj kot se vrednost SGI bliža -2 (ali jo preseže), bolj ekstremna je suša. Pozitivne vrednosti SGI pomenijo, da suše ni.

Prednost indeksa SGI za določanje sušnih gladin podzemne vode v primerjavi z grobimi podatki o izmerjenih gladinah podzemne vode je, da vrednosti indeksa SGI ne variirajo tako močno med sezonami, prav tako pa lahko iz vrednosti indeksa SGI razberemo nekatere značilnosti, ki se pojavljajo

* Andrej DRAKSLER, univ. dipl. geogr., Zgornje Bitnje 14a, 4209 Žabnica,

** dr. Peter FRANTAR, univ. dipl. geogr.,

** Vlado SAVIČ, dipl. inž. grad., Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana.

na več vodomernih postajah hkrati v daljšem časovnem obdobju (npr. več zaporednih let z nizkimi gladinami).

Vrednost SGI	Stopnja suše
-2 ali manj	Ekstremna suša
Od -1,5 do -1,99	Huda suša
-1,0 do -1,49	Zmerna suša
Od 0 do -0,99	Minimalna suša
Nad 0	Ni suše

Tabela 1: Vrednosti indeksa SGI in stopnje hidrološke suše

Pri izračunu indeksa je pomembna dolžina izbranega obdobja meritev, za neposredno primerjavo med merilnimi mesti pa mora biti indeks izračunan na podlagi enakega obdobja. Na podlagi indeksa SGI obenem lahko dobro napovedujemo sušna obdobja in sklepamo o pojavu suš tudi za pretekla obdobja, za katera je na voljo manjša količina podatkov o gladinah podzemne vode (Bloomfield, Marchant, 2013).

IZBOR VODOMERNIH POSTAJ

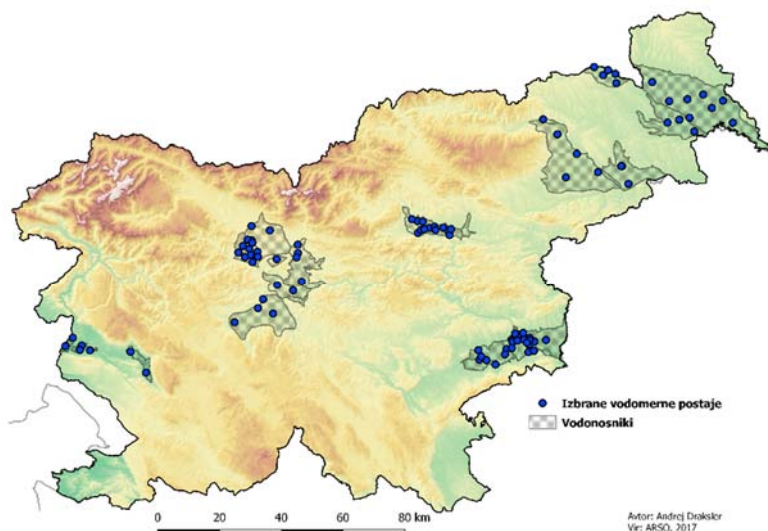
Za izračun indeksa SGI smo izbrali nabor vodomernih postaj s čim bolj popolnim podatkovnim nizom. Izračun je temeljil na mesečnih vrednostih nivojev podzemne vode. Zaradi različnih hidrogeoloških značilnosti vodonosnikov in lokalnih posebnosti na območju vodomernih postaj, je bila potrebna tudi primerna geografska razporeditev izbranih vodomernih postaj na celotnem območju Slovenije.

Izbor vodomernih postaj je bil opravljen na podlagi naslednjih kriterijev:

- vodomerna postaja ima podatke o nivoju podzemne vode za celotno obdobje 1981–2010;
- vodomerna postaja ima v podatkovnem nizu posameznega meseca za obdobje 1981–2010 največ 3 manjkajoče vrednosti.

Začetni nabor je obsegal 139 vodomernih postaj s podatki o nivoju podzemne vode. Po pregledu na podlagi kriterijev smo dobili nabor 95 vodomernih postaj, ki so razporejene po različnih vodonosnikih v Sloveniji (Slika 1 in tabela 2).

Vodonosnik	Število postaj
Prekmursko polje	8
Mursko polje	5
Apaško polje	6
Ptujsko polje	3
Vrbanski plato	1
Dravsko polje	4
Spodnja Savinjska dolina	10
Dolina Bolske	3
Brežiško polje	5
Krško polje	12
Območje Krakova	4
Šentjernejsko polje	2
Dolina Kamniške Bistrice	4
Kranjsko polje	4
Vodiško polje	1
Sorško polje	10
Ljubljansko polje	2
Ljubljansko barje	4
Vipavsko - Soška dolina	7
Skupaj	95



Slika 1: Lokacije vodomernih postaj

Tabela 2: Izbrane vodomerne postaje za izračun indeksa SGI.

IZRAČUN INDEKSA SGI

Indeks SGI smo izračunali v treh fazah (Bloomfield, Marchant, 2013):

- rangiranje vrednosti v podatkovnem nizu (vrednosti nivojev za posamični mesec na vodomerni postaji) - z_i , za vsak mesec posebej;
- določitev vrednosti p_i za rangirano mesečno vrednost;
- uporaba funkcije inverzne normalne kumulativne porazdelitve za vsak p_i , rezultat je vrednost SGI.

Vrednost z_i je rang, kjer i pomeni zaporedno število ranga glede na vrednost mesečnega nivoja (rang 1 ima leto z najnižjim nivojem v posameznem mesecu). Vrednost p_i predstavlja verjetnost, da je naključna vrednost znotraj prilagojene porazdelitve manjša ali enaka izbranemu rangu. Vrednosti p_i so enakomerno porazdeljene v razponu od $1/(2n)$ do $1 - 1/(2n)$, kjer je n število vseh meritev (število let) v podatkovnem nizu (če ima vodomerna postaja poln niz za določen mesec, je $n = 30$). Indeks SGI, izračunan s funkcijo inverzne normalne kumulativne porazdelitve za vsak p_i , se ujema z vrednostjo p_i : višja kot je vrednost p_i , višji je indeks SGI.

Indeks SGI smo izračunali za obdobje 1981–2010. Izjeme so bile vodomerne postaje na Sorškem (9 postaj) in Kranjskem polju (2 postaji), ki so pod vplivom zaježitve reke Save ob izgradnji hidroelektrarne Mavčiče v sredini 80. let 20. stoletja. Zaježitvi je namreč sledil dvig gladin podzemne vode, velike razlike v gladinah pred in po zaježitvi pa bi pomenile nereprezentativne izračune indeksa SGI. Zato smo za omenjene vodomerne postaje uporabili podatke po dvigu gladin, od maja 1986 dalje. Kljub temu se nekateri vplivi zaježitve odražajo v končnih vrednostih SGI.

Izračunane mesečne vrednosti indeksa SGI na vsaki od 95 vodomernih postaj smo združili v nize celotnega obravnavanega obdobja 1981–2010. Ti prikazi standardiziranih vrednosti gladin podzemne vode nam omogočajo vpogled v sušna obdobja na posamezni vodomerni postaji.

ANALIZA REZULTATOV

Standardizirane vrednosti gladin podzemne vode v obdobju 1981–2010 so podlaga za primerjalno analizo vrednosti indeksa SGI med vodomernimi postajami na različnih vodonosnikih po Sloveniji.

Primerjava po postajah in vodonosnikih je pokazala, da je bilo v obdobju 1981–2010 več daljših sušnih obdobj, ki so bila značilna za večje število vodonosnikov (tabela 3).

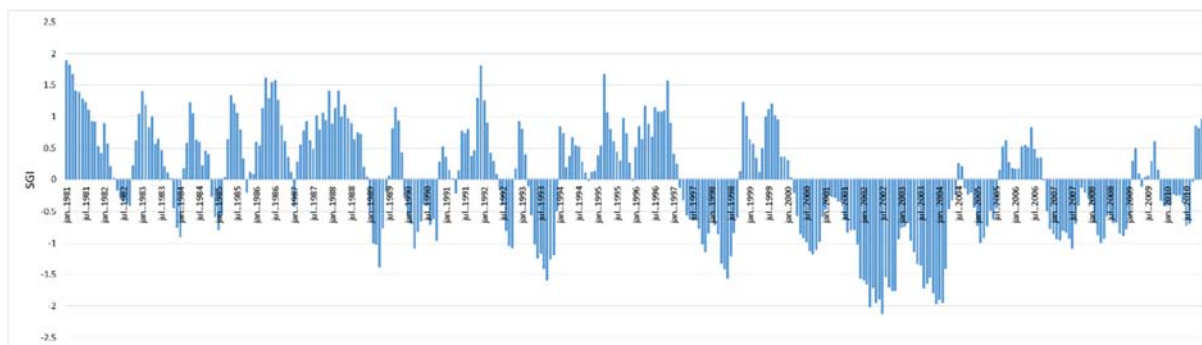
Po trajanju najbolj izstopa pet sušnih obdobj, ki so trajala 12 mesecev ali več:

- Od novembra 1989 do oktobra 1990, ko so povprečne vrednosti indeksa SGI na 12 od 19 vodonosnikov nižje od 0, na vodonosnikih Dolina Bolske, Spodnja Savinjska dolina, območje Krakova in Šentjernejsko polje je imelo več zaporednih mesecev indeks SGI nižji od -1, posamezni meseci pa pod -1,5. Še dodatno izstopa Ljubljansko polje, ki je imelo negativne povprečne vrednosti že od oktobra 1988 (skupaj 25 mesecev), od tega 8 mesecev vrednosti indeksa SGI nižje od -1,5.
- Od aprila 1997 do junija 1998. Obdobje sicer ne beleži ekstremno nizkih negativnih vrednosti SGI, vendar se je sušno obdobje v dolžini vsaj nekaj mesecev pojavilo na 17 vodonosnikih Slovenije.
- Sušni obdobji od julija 2001 do julija 2002 in od marca 2003 do februarja 2004 sta najbolj izraziti po intenzivnosti, na nekaterih vodonosnikih pa tudi po trajanju. Vsi obravnavani vodonosniki so imeli večmesečne zaporedne negativne povprečne vrednosti indeksa SGI, na 10 vodonosnikih so se pojavile povprečne mesečne vrednosti SGI nižje od -2, kar predstavlja stopnjo ekstremne suše. Gladine podzemne vode so bile izjemno nizke na Apaškem, Dravskem, Ptujskem, Prekmurskem in Murskem polju že v letu 2002, situacija pa se je ponovila leto kasneje. V obeh primerih je šlo za do 9 zaporednih mesecev (na Dravskem polju celo 12) z vrednostmi SGI pod -1,5 in vmesnimi vrednostmi pod -2. V letu 2003 se je povprečni mesečni SGI vsaj enkrat spustil pod -1,5 na 17 od 19 vodonosnikov. Na Ptujskem, Murskem in Prekmurskem polju so bile neprekinjene negativne povprečne vrednosti SGI od marca leta 2000 do marca 2004, torej 49 mesecev, na Dravskem polju pa do junija 2004 (52 mesecev). Izjemno nizke gladine podzemne vode od leta 2000 so bile že proučevane tudi v preteklih izvedbah Mišičevega vodarskega dne (Mikulič in sod., 2003)
- Od oktobra 2006 do septembra 2007 so razvidne negativne povprečne vrednosti SGI na 13 vodonosnikih, pri tem pa so bile najnižje gladine zabeležene na vodonosnikih Dolina Kamniške Bistrice ter na Kranjskem, Sorškem in Vodiškem polju.

Po intenzivnosti suše izstopa leto 1993, ko se je na 6 vodonosnikih povprečni SGI vsaj v enem mesecu spustil pod -2, ter že omenjeni obdobji med letoma 2001 in 2004 (10 vodonosnikov). Nekoliko krajše, a izrazito sušno obdobje je bilo tudi od novembra 1988 do aprila 1989, ko se je na 4 vodonosnikih povprečni mesečni SGI vsaj enkrat spustil pod mejo ekstremne suše.

Začetek sušnega obdobja	Konec sušnega obdobja	Trajanje (mesece)	Število vodonosnikov	Število vodonosnikov s krajšim trajanjem
oktober 1981	julij 1982	10	6	5
julij 1983	december 1983	6	16	
oktober 1986	januar 1987	4	15	
november 1988	april 1989	6	16	
november 1989	oktober 1990	12	12	2
februar 1993	september 1993	8	17	
april 1997	junij 1998	15	12	5
marec 2000	oktober 2000	8	13	
julij 2001	julij 2002	13	10	5
marec 2003	februar 2004	12	18	1
december 2004	junij 2005	7	9	5
oktober 2006	september 2007	12	13	

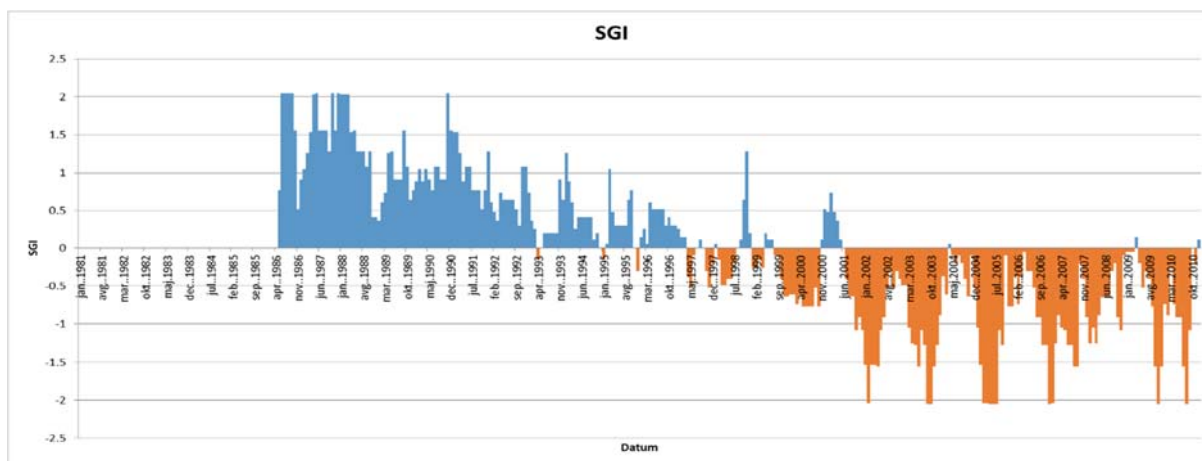
Tabela 3: Glavna sušna obdobja (indeks SGI < 0).



Slika 2: Primer niza mesečnih vrednosti indeksa hidrološke suše podzemnih voda SGI na Dravskem polju. Po letu 2000 se je število sušnih mesecev izrazito povečalo.

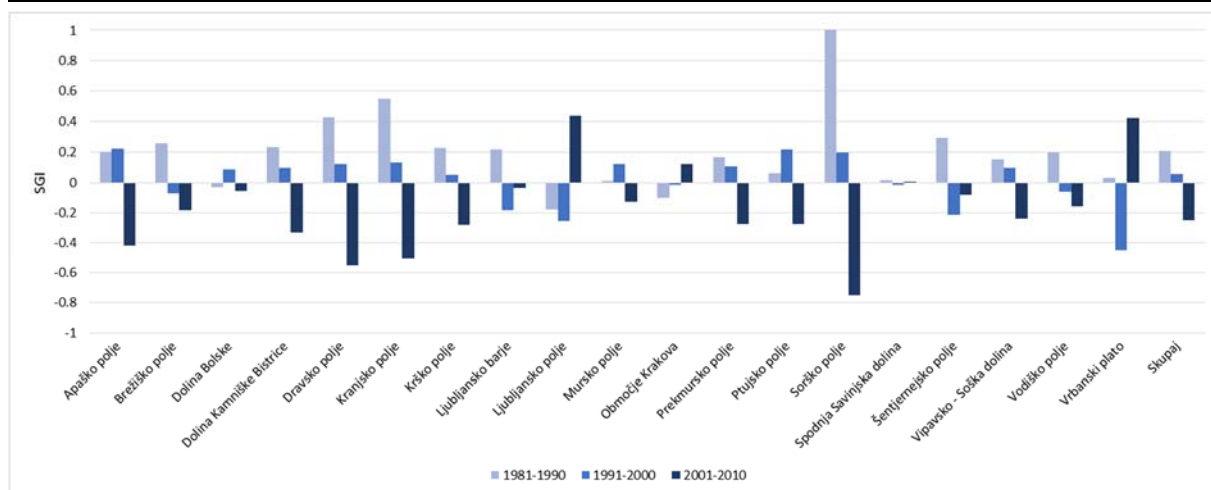
Primerjava med dekadami je pokazala, da so se najnižje vrednosti v večini vodonosnikov pojavile v zadnji dekad 2001–2010 (slika 2 in slika 4). Na teh 13 vodonosnikih so bile torej gladine podzemnih voda najnižje v zadnji dekad in so bile pod povprečjem gladin celotnega obdobja 1981–2010. Negativnih povprečnih vrednosti na teh vodonosnikih v zadnji dekad ne smemo enačiti s stalnim pojavom suše, saj nanje vplivajo večkratni pojavi zelo nizkih negativnih vrednosti indeksa SGI ob hudih sušah (denimo v letih 2002 in 2003).

Zelo izrazit padec vrednosti indeksa SGI je na Sorškem in deloma tudi na Kranjskem polju. Omenjena zavezitev Save nad hidroelektrarno Mavčiče je povzročila hiter dvig gladin podzemne vode leta 1986, temu pa je sledilo daljše obdobje postopnega upadanja, ki se odraža v nizkih vrednostih SGI v zadnji dekad. Večina mesečnih gladin v zadnji dekad je namreč zaradi visokih gladin v drugi polovici 80. let pod povprečjem tridesetletnega obdobja. Izstopajoča sušna obdobja so kljub temu vidna in se ujemajo s sušnimi obdobji na ostalih vodonosnikih (slika 3).



Slika 3: Niz mesečnih vrednosti indeksa SGI na vodomerni postaji Žabnica (80030) na Sorškem polju. Viden je vpliv HE Mavčiče, kar je povzročilo dvig podzemne vode po napolnjenju akumulacije ter zniževanje v prihodnjih letih zaradi zamuljevanja.

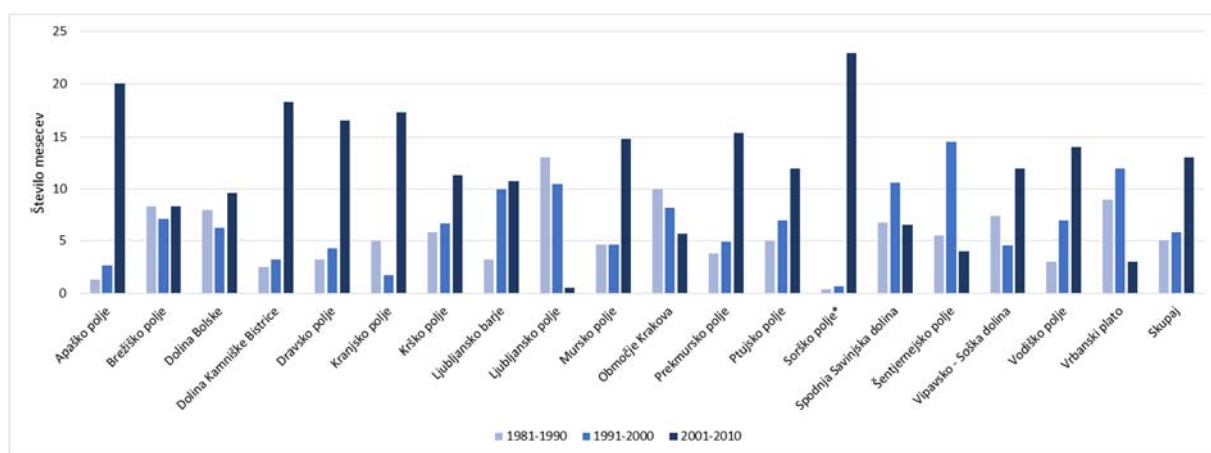
Pojav višjih gladin in vrednosti indeksa SGI v zadnji dekad je značilen za Ljubljansko polje, Vrbanski plato ter območje Krakova (slika 4). Vodomerni postaji Kleče in Hrastje na Ljubljanskem polju sta pod vplivom črpanja podzemne vode, ki je naraščalo do začetka 90. let 20. stoletja, nato pa se je občutno zmanjšalo. Pod vplivom črpališč je tudi vodomerna postaja Kamnica na Vrbanskem platu, obenem pa leži v neposredni bližini reke Drave, ki z zatekanjem vpliva na nihanje gladin podzemne vode. Omenjene okoliščine se odražajo v rezultatih indeksa SGI.



Slika 4: Povprečni SGI na vodomernih postajah vodonosnikov po dekadah

V primerjavi s predhodnima dekadama se je v dekadi 2001–2010 močno povečalo število mesecev z najnižjimi vrednostmi SGI. Slika 5 prikazuje povprečno število mesecev, ki so bili z izračunom indeksa SGI opredeljeni kot meseci s hudo ali ekstremno sušo ($SGI < -1,5$). V obdobju 2001–2010 je bilo v povprečju 13 takšnih mesecev, 5,9 v obdobju 1991–2000 in 5 v obdobju 1981–1990. Najizrazitejše povečanje beležijo vodomerne postaje na vodonosnikih SV Slovenije ter dolina Kamniške Bistrice in Vodiško polje v osrednji Sloveniji. Večje število najsušnejših mesecev na Sorškem in Kranjskem polju je posledica zaježitve nad hidroelektrarno Mavčiče.

Ljubljansko polje, Vrbanški plato, območje Krakova in Šentjernejsko polje ponovno prikazujejo obratno sliko, z le nekaj meseci hudih suš v zadnji dekadi.



Slika 5: Povprečno število mesecev z vrednostjo SGI pod -1,5 na vodomernih postajah vodonosnikov po dekadah

Analiza sezonskih vrednosti SGI je pokazala, da je bila večina zimskih vrednosti SGI v prvi dekadi okrog 0 z majhnimi nihanjem med vodonosniki. V drugi dekadi so vrednosti SGI višje in so večinoma pozitivne, po nadpovprečnih gladinah nekoliko izstopa SV Slovenije. V zadnji dekadi ima večina vodonosnikov negativno povprečno vrednost indeksa. SV del Slovenije tokrat izstopa z višjo stopnjo sušnosti.

Pomlad v obdobju 1981–1990 je imela na veliki večini vodonosnikov pozitivne vrednosti SGI (povprečni SGI je 0,36). V drugi dekadi so bile vrednosti SGI na večini vodonosnikov (razen na SV Slovenije) že pod tridesetletnim povprečjem (povprečni SGI je -0,12), v zadnji dekadi pa so se pod 0 spustile tudi vrednosti SGI na SV Slovenije, povprečna vrednost indeksa je bila -0,2.

Poletje kaže podobno sliko, z najvišjimi vrednostmi SGI v prvi dekadi (povprečje 0,38), nato pa upadom v drugi in tretji dekadi. Posebej viden konstanten padec vrednosti je na vodonosnikih SV Slovenije.

Jesen v prvi dekadi z večinoma povprečnimi gladinami podzemne vode ne kaže posebnega vzorca. Sledila je večinoma nadpovprečna druga dekada, v tretji pa so vrednosti indeksa SGI na večini vodonosnikov padle pod 0.

V splošnem je bilo v obdobju 1981–2010 za pomlad in poletje značilno padanje vrednosti SGI od prve do tretje dekade. Jeseni in pozimi je v treh dekadah med vodonosniki več nihanja, z najnižjimi vrednostmi v zadnji dekadi. Razlike v vrednosti SGI med dekadami so manjše jeseni in pozimi.

Vrednosti SGI na Sorškem, Kranjskem, Ljubljanskem polju in Vrbanskem platoju, tako kot na mesečni, izstopajo tudi na sezonski ravni.

ZAKLJUČEK

Z izračunom in analizo indeksa SGI smo na obravnavanih vodomernih postajah in vodonosnikih Slovenije opredelili več sušnih dogodkov v referenčnem obdobju 1981–2010. Ugotovili smo, da uporabljena metodologija dobro nakazuje pretekle sušne dogodke in omogoča medsebojno primerjavo različnih vodonosnikov, kar je temeljna prednost indeksa. Obdobja nizkih vrednosti SGI se ujemajo s preteklimi sušnimi dogodki (opisani v Potočnik, 2014; Sušnik, 2013; Sušnik, 2014,...). Za določanje sušnih gladin podzemnih voda z indeksom SGI je smiselno uporabiti čim daljše podatkovne nize, s tem pa se poveča tudi zanesljivost določanja sušnih gladin izven obdobja izračuna indeksa SGI. Na primerih Kranjskega, Sorškega, Ljubljanskega polja in Vrbanskega platoja se je pokazalo, da je pri izračunu indeksa potrebno posebej upoštevati morebitne antropogene ali druge dejavnike na merilnih mestih ali vodonosnikih, ki vplivajo na rezultate.

LITERATURA

Bloomfield, J. P., Marchant, B. P., 2013: Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences.*, 17, 4769–4787. URL: <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/4769/2013/>

Mikulič, Z., Andjelov, M., Robič, M., Trišič, N., 2003: Nizka vodna stanja v aluvialnih vodonosnikih Slovenije. Suša v letu 2003. 14. Mišičev vodarski dan 2003, str. 92-98.

Potočnik, N., 2014: Kazalci za sprotno vrednotenje hidrološke suše, diplomska naloga št.: 3371/hs. Univerza v Ljubljani.

Sušnik, A., 2013: Kmetijska suša – od sledenja do upravljanja. Nacionalno posvetovanje o prilagajanju podnebnim spremembam in suši, Ljubljana, 06.02.2013. Medmrežje: <http://www.arso.gov.si/podnebne%20spremembe/projekti/Susnik.pdf>

Sušnik, A., 2014: Zasnove kazalcev spremljanja suše na kmetijskih površinah, doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, 2014.

Van Loon, A.F., Laaha, G., 2015: Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology*, Volume 526, July 2015, Pages 3-14. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.059>

WMO - World Meteorological Organization, 2012: Standardized Precipitation Index User Guide (M. Svoboda, M. Hayes and D. Wood). (WMO-No. 1090), Geneva.