

Primljen / Received: 22.6.2014.
 Ispravljen / Corrected: 28.12.2014.
 Prihvaćen / Accepted: 23.1.2015.

Dostupno online / Available online: 10.2.2015.

Usporedba različitih metoda za ocjenu suše na području kontinentalne Hrvatske

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Lidija Tadić**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku
 Građevinski fakultet
ltadic@gfos.hr



Tamara Dadić, mag.ing.aedif.
 Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku
 Građevinski fakultet
tamaradadic@gfos.hr



Mihaela Bosak, mag.ing.aedif.
 Valenčak d.o.o
 Našice
mihaela5.na@gmail.com

Pregledni rad

Lidija Tadić, Tamara Dadić, Mihaela Bosak

Usporedba različitih metoda za ocjenu suše na području kontinentalne Hrvatske

Suša je ekstremna hidrološka pojava koja izaziva velike gospodarske i ekološke štete. Identifikacija i kvantifikacija suše provodi se primjenom različitih metoda. Za područje kontinentalne Hrvatske, na 15 meteoroloških postaja od 1981. do 2011. godine, provedena je analiza 5 metoda za identifikaciju suše: indeks standardiziranih oborina, metoda decila, postotak od normale, indeks anomalije oborina i metoda koraka. Rezultati su pokazali da svaka od metoda ima svoje specifičnosti, ali su sve primjenjive za analizirano područje. Indeks standardiziranih oborina ima značajnu korelaciju s metodom decila, postotkom od normale i indeksom anomalije oborina.

Ključne riječi:

suša, indeks standardiziranih oborina, metoda decila, postotak od normale, indeks anomalije oborina, metoda koraka

Subject review

Lidija Tadić, Tamara Dadić, Mihaela Bosak

Comparison of different drought assessment methods in continental Croatia

Drought is an extreme hydrological event that causes great economic and environmental damage. Various methods are used for the identification and quantification of drought. The analysis of five drought identification methods was conducted for continental Croatia on 15 weather stations in the period from 1981 to 2011: standardised precipitation index, deciles index, percent of normal precipitation, rainfall anomaly index, and threshold level method. Results have revealed that each of these methods has its specific features but that all are applicable for the area under study. There is a significant correlation between the standard precipitation index and the deciles index, rainfall anomaly index, and percent of normal.

Key words:

drought, standardised precipitation index, deciles index, percent of normal, rainfall anomaly index, threshold level method

Übersichtsarbeit

Lidija Tadić, Tamara Dadić, Mihaela Bosak

Vergleich der Methoden zur Beurteilung von Dürre im kontinentalen Kroatien

Dürre ist ein extremes hydrologisches Phänomen, das große wirtschaftliche und ökologische Schäden verursacht. Die Identifizierung und Quantifizierung von Dürre wird mittels verschiedener Methoden durchgeführt. Im kontinentalen Raum Kroatiens ist für 15 meteorologischen Stationen im Zeitraum von 1981 bis 2011 eine Analyse der folgenden fünf Methoden zur Identifizierung von Dürre durchgeführt: standardisierter Niederschlagsindex, Dezil-Methode, Normalprozentsatz, Index der Niederschlagsanomalie und Schrittverfahren. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die einzelnen Methoden ihre Besonderheiten haben, aber für das analysierte Gebiet anwendbar sind. Der standardisierte Niederschlagsindex hat eine bedeutende Korrelation zur Dezil-Methode, dem Normalprozentsatz und dem Index der Niederschlagsanomalie.

Schlüsselwörter:

Dürre, standardisierter Niederschlagsindex, Dezil-Methode, Normalprozentsatz, Index der Niederschlagsanomalie, Schrittverfahren

1. Uvod

Učestala pojava suša jedan je od problema kojim se znanstvenici intenzivno bave posljednja dva desetljeća, analizirajući učestalost pojave suše kao ekstremne hidrološke pojave koja ima velike negativne posljedice na gospodarstvo nekog područja ili regije. Gotovo da nema klimatskog područja u kojem se posljednjih desetljeća ne javljaju suše različitih intenziteta, uzrokovane najvećom prijetnjom 21. stoljeća, a to su klimatske promjene. U Europi su suše najčešće u njezinom južnom i jugoistočnom dijelu, ali su 1989., 1991., a osobito 2003. godine zabilježene suše koju su zahvatile cijelu Europu. Analiza suše na području južne Italije za razdoblje od 1923. do 2000. godine pokazala je veću učestalost suša nakon 1975. godine i značajno smanjenje količina oborina tijekom zimskih mjeseci [1]. Obično se naglašavaju posljedice suše u poljoprivredi, međutim njezin je golem negativan učinak na prirodne ekosustave, što zbog sporosti procesa i veličine prostora koji zahvaća, još nije dovoljno istraženo [2]. Složenost suše je u tome što se teško može predvidjeti, zahvaća velika pristranstva, razvija se sporo i najčešće se uočava kada je već prisutna tjednima ili mjesecima. Ne postoji niti jedinstvena definicija suše, kao ni pouzdana metodologija njezinog kvantificiranja. Najopćenitije se može reći da je suša svaki manjak oborina u odnosu na normalnu (prosječnu) količinu oborina nekog klimatskog područja. Samim tim suša postaje najsloženija hidrološka pojava koja se javlja u svim klimatskim područjima različitog trajanja, intenziteta i učestalosti, a učinkovitost obrane od suše je vrlo slaba [3].

Zbog toga je u hidrološkim istraživanjima prisutan velik broj metoda (indeksa) koje služe za ocjenu suše, a bazirane su uglavnom na hidrološkim parametrima (protocima i vodostajima) i meteorološkim parametrima (oborinama i temperaturi zraka). Niti jedna od metoda koje se primjenjuju nije univerzalna, niti apsolutno točna. Njihova primjena temeljena je uglavnom na regionalnoj osnovi, ali i na dostupnosti podataka. Odabir pojedine metode na nekom području ovisi o raspoloživim podatcima i sposobnosti pojedine metode da na najbolji način ocijeni vremensku i prostornu pojavnost i varijabilnost suše [4]. Stoga bi kriteriji za odabir najbolje metode za analizu suše bili sljedeći: neovisnost o geografskim i klimatskim karakteristikama nekog područja, uključujući i ekstremne klimatske uvjete (pustinske ili polarne), fizikalna utemeljenost metode i jednostavnost proračuna [3]. Poseban su problem vremenske jedinice na kojima se temelje različiti indeksi. Najčešće su to mjeseci, što može u specifičnim i stohastičkim raspodjelama oborina tijekom jednog mjeseca dovesti do krivih zaključaka [5]. Niti jedna metoda koja se preporuča ne zadovoljava sve nabrojane kriterije.

U SAD-u se najčešće koriste Palmerov indeks suše [6] i indeks standardiziranih oborina [7], u Australiji metoda decila [8], a u Kini Z-indeks [9]. Tu su još i metoda koraka [10], indeks anomalije oborina [11] i, najjednostavnija metoda koja se zasniva na anomaliji oborina ili postotku od normalne oborine. Ovim metodama, ali i svim ostalim, zajedničko je to da na različite

načine opisuju i kvantificiraju manjak vode relativno u odnosu na prosječne uvjete vlažnosti tla, količine oborina ili protoke.

U svijetu je objavljen velik broj radova koji se bave upravo usporedbama različitih metoda za kvantificiranje suše. Na temelju 73-godišnjeg niza oborina područja Lakoja u Nigeriji, od četiri uspoređene metode, stohastičke komponente vremenskih nizova (SCTS), indeksa anomalije oborina (RAI), indeksa jakosti suše (DSI) i kumulativne informacije o oborinama (CRI) najpogodnijom je ocijenjen indeks anomalije oborina (RAI) jer daje najviše informacija o pojavnosti i jakosti suše analiziranog područja [12]. Usporedba karakteristika triju metoda za ocjenu meteorološke suše, Palmerovog indeksa suše (PDI), Bhalme-Mooley indeksa suše (BMDI) i indeksa anomalije oborina (RAI) za područje Nebraske (SAD) pokazuje da su sve tri metode pogodne za identifikaciju suše, a oborina je dominantan čimbenik pojavnosti suše te su jednostavne metode koje se zasnivaju samo na analizi oborina jednako dobre kao i vrlo složeni indeksi suše [13]. Za područje SAD-a provedena istraživanja pokazuju vrlo veliku korelaciju ($r = 0,97$) između indeksa standardiziranih oborina (SPI) i indeksa anomalije oborina (RAI), dok je veza između Palmerovog indeksa jakosti suše (PDSI) i indeksa anomalije oborina znatno slabija [14]. Metode koje se javljaju u novije vrijeme nastoje obuhvatiti sve najvažnije komponente vodne bilance (oborinu, evapotranspiraciju, vlažnost tla, površinsko otjecanje i snijeg), a da ipak budu relativno jednostavne za primjenu [15]. Jedna od njih je indeks efektivne suše (EDI) koja je drugačija od ostalih već po tome što je temeljena na dnevnim podatcima, a do sada se vremenski korak od jednog mjeseca smatrao najpogodnijim za kvantificiranje suše [16]. Indeks efektivne suše zasniva se na dnevnoj akumulaciji oborinske vode s težinskim faktorom tijekom vremena. Usporedba ove metode s indeksom standardiziranih oborina upućuje na vrlo malu korelaciju kada se radi o kratkim razdobljima, a ona se povećava kada se razdoblje produži na 9 mjeseci ili godinu dana [16, 17].

Na području Hrvatske također su se analizirale suše. Analizom suše na području Osijeka u razdoblju od 1982. do 1990. godine metodom koraka, decila i diskretnih Markovljevih lanaca zaključeno je da su dobiveni rezultati slični bez obzira na metodu [18]. Mogućnosti prognoziranja suša na vremenskim skalama od jednog do tri mjeseca primjenom standardiziranog indeksa oborina analizirane su na pet meteoroloških postaja u Hrvatskoj i zaključak je da prognoze imaju dobru pouzdanost za razdoblje od jednog mjeseca, dok su pouzdanosti prognoza dužeg razdoblja manje pouzdane [19]. Analiza suše za meteorološku postaju Zagreb-Grič, prema indeksu standardiziranih oborina u 2003. i 2004. godini, pokazala je izuzetnu jakost na razini trajanja od jednog mjeseca, ali ne i za trajanja 3, 6 i 12 mjeseci [20]. Suše na otoku Korčuli analizirane su za razdoblje od 1948. do 2008. godine prema indeksu standardiziranih oborina, Palmerovoj metodi, metodi decila i metodi koraka [21].

Iz ovih primjera vidljivo je da je problem suše vrlo složen i prisutan u različitim klimatskim područjima, i da znanstvenici nastoje odgovoriti na brojna pitanja o njezinoj pojavnosti i kvantifikaciji.

Istovremeno, u Hrvatskoj je objavljen relativno mali broj radova koji se bave ovom ekstremnom hidrološkom pojavom. Upravo ta činjenica osnovna je motivacija za analizu suše u Hrvatskoj, i to u njezinom kontinentalnom dijelu gdje je poljoprivreda važna gospodarska grana, a posljednjih godina trpi velike štete od suše. Prema tome, na primjeru tog područja treba ispitati pogodnost primjene metoda koje se najčešće koriste za analizu suše. Uz to se ne želi zanemariti ni utjecaj suša na okoliš, jer se u tom dijelu Hrvatske nalaze vrijedni vodeni ekosustavi kao što su Kopački rit i Lonjsko polje čiji opstanak ovisi o količini oborina i učestalosti plavljenja.

U nastavku rada prikazano je pet metoda za ocjenu suše: indeks standardiziranih oborina, metoda koraka, indeks anomalije oborina, metoda decila i postotak od normale ili anomalija oborina. Sve navedene metode primijenjene su na isti niz podataka o količini oborina (1981.-2011.), a osnovna vremenska jedinica je jedan mjesec. Promatrano razdoblje od 31 godine smatra se dostatno dugim za analizu suše [8, 22].

2. Opis metoda

2.1. Indeks standardiziranih oborina

Od navedenih metoda, najčešće primjenjivana je indeks standardiziranih oborina (engl. *Standardized Precipitation Index, SPI*), i to u svim dijelovima svijeta bez obzira na klimatska ili topografska obilježja. Prema jednim autorima nije preporučljiva za primjenu na globalnoj razini, a nasuprot tome, Svjetska meteorološka organizacija smatra da nema ograničenja u razini primjene jer je neovisna o karakteristikama sliva. SPI je utemeljena na normaliziranoj gama-distribuciji oborina i predstavlja broj standardnih devijacija u odnosu na srednju vrijednost. Osnovna je prednost ove metode u tome što je potrebno raspolagati samo nizom oborina dužega razdoblja (30 i više godina) i može se primijeniti na različite vremenske skale, a najčešće se koriste 1, 3, 6, 12 i 24 mjeseca. Time se isti indeks može koristiti za ocjenu deficita oborina na različite vodne resurse (podzemne vode, otvorene vodotoke, vlažnost tla) ovisno o potrebi za koju se analiza suša provodi. Za analizu poljoprivredne suše mjerodavna su trajanja od 1 do 6 mjeseci, za meteorološku sušu 1 do 2 mjeseca, a za hidrološku sušu 6 do 24 mjeseca (pozitivan SPI upućuje na veće količine oborina u odnosu na srednju višegodišnju vrijednost, a negativan na oborine manje od srednjih). Upitna je njezina primjenjivost u suhim predjelima kod kojih se javljaju brojni mjeseci bez oborina, kao i za razdoblja kraća od 12 mjeseci, budući da gama-razdioba nije definirana za vrijednosti jednake nuli. U tom slučaju se u izraz za kumulativnu funkciju vjerojatnosti dodatno uvodi i vjerojatnost da je količina oborine jednaka nuli.

Indeks standardiziranih oborina ima definirane granične vrijednosti u ovisnosti o relativnoj frekvenciji pojave suše što omogućava usporedbu vrijednosti različitih lokacija ili regija. To je prikazano u tablici 1. (prema [7]). Za izračun mjesečnih

indeksa standardiziranih oborina korišten je računalni program "spi_sl_6" (National Drought Mitigation Center, SAD) [23].

2.2. Metoda decila

Metoda decila (engl. *Deciles Index, DI*) temeljena je na podjeli dužeg niza opažanja oborina u decile ili desetine distribucije [6, 26]. Razvila se kao poboljšanje postotka od normalne oborine ili anomalije oborina. Decili se izračunavaju temeljem broja pojava distribuiranih od 1 do 10. Najniže vrijednosti upućuju na uvjete sušnije od prosječnih, a više vrijednosti upućuju na vlažnije uvjete. Sve mjesečne oborine promatranog razdoblja rangiraju se od najmanje prema najvećoj i tada prvi decil označava 10 % najmanjih količina oborina, drugi decil oborine koje su između 10 i 20 % itd. Medijanu odgovara količina oborine koja ima 50 %-tnu vjerojatnost pojave u promatranom razdoblju. Svako skupini odgovara opis razine sušnosti, odnosno vlažnosti. Stanje vlažnosti označeno kao "normalno" (30-70 %) u originalnoj metodi decila ima prošireniju klasifikaciju na "blago ispod normale"; "normalno" i blago iznad normale", što je radi lakše usporedbe s ostalim metodama pojednostavljeno u jednu kategoriju, i to je vidljivo u tablici 1. [22].

2.3. Postotak od normalne oborine

Postotak od normalne oborine (engl. *Percent of Normal, PN*) ili anomalija oborina zasniva se na odnosu mjesečnih oborina i prosječne mjesečne oborine promatranog razdoblja. Predstavlja jednostavnu metodu koja služi za brzu ocjenu pojavnosti suše, a može biti zadovoljavajuća ako se raspolože dužim nizom podataka o oborinama (najmanje 30 godina) i ako se primjenjuje unutar jedne regije sličnih geografskih karakteristika. Teško se mogu uspoređivati lokacije koje su međusobno udaljene jer su anomalije definirane relativno za svaku lokaciju (meteorološku postaju) posebno.

2.4. Indeks anomalije oborina

Indeks anomalije oborina (engl. *Rainfall Anomaly Index, RAI*) može se primijeniti na tjedne, mjesečne i godišnje podatke o oborinama [8]. Osnovni izraz glasi:

$$RAI = \pm 3 \frac{P - \bar{P}}{\bar{E} - \bar{P}} \quad (1)$$

gdje je:

P - oborina [mm]

\bar{P} - srednja oborina određenog razdoblja [mm]

\bar{E} - srednja vrijednost od 10 najvećih zabilježenih mjesečnih količina oborina [mm].

Pozitivan ili negativan predznak odnosi se na pozitivne ili negativne anomalije oborina. Indeks anomalije oborina, slično

Tablica 1. Granične vrijednosti indeksa standardiziranih oborina (SPI), metode decila (DI), postotka od normale (PN) i indeks anomalije oborina (RAI)

Klasifikacija	SPI [7]	DI [%] [22]	PN [%] [4]	RAI [8]
Ekstremno vlažno	≥ 2,00	≥ 90	≥ 110	≥ 3,00
Vrlo vlažno	1,50 do 1,99	80 do 90		2 do 2,99
Umjereno vlažno	1,00 do 1,49	70 do 80		1 do 1,99
Normalno	0,99 do -0,99	30 do 70	80 do 110	0,5 do -0,99
Umjereno sušno	-1,0 do -1,49	20 do 30	55 do 80	-1,00 do -1,99
Vrlo sušno	-1,5 do -1,99	10 do 20	40 do 55	-2,00 do -2,99
Ekstremno sušno	≤ -2,00	≤ 10	≤ 40	≤ -3,00

kao i metoda decila, ima klasifikaciju na 7 karakterističnih razreda vlažnosti/sušnosti, te je radi usporedbe s indeksom standardiziranih oborina i postotkom od normale prošireno stanje normalne vlažnosti od 0,49 do -0,49 i na blago vlažno od 0,5 do 0,99 i blago suho od -0,5 do -0,99, što je prikazano u tablici 1.

Ove četiri metode imaju sličnu karakterizaciju sušnosti odnosno vlažnosti iskazane rasponom numeričkih vrijednosti pa ih je moguće uspoređivati.

2.5. Metoda koraka

Metoda koraka (engl. *Threshold Level Method*) naziva se još i metoda sušnih razdoblja. Drugačija je od prethodnih metoda prema pristupu problemu suše, razlikujući trajanje suše (T), jakost (S) i intenzitet suše (I) [10]. U ovom radu primijenjena je na količine oborine, a može se primijeniti i na protoke i vodostaje. Trajanje suše, odnosno deficita, neprekidno je trajanje ili korak niza mjeseci u kojem je analizirani parametar (oborina, protok ili vodostaj) manji od srednje mjesečne oborine analiziranog razdoblja, što je u ovom slučaju srednja mjesečna oborina analiziranog razdoblja. Jakost deficita predstavlja sumu deficita unutar jednog koraka (2), a intenzitet se dobije dijeljenjem jakosti i trajanja (3).

$$S = \sum_{i=1}^r x_i - \bar{x} \quad (2)$$

$$I = \frac{S}{T} \sum_{i=1}^r x_i - \bar{x} \quad (3)$$

gdje je

x - mjesečna oborina, protok ili vodostaj (mm, m³/s, cm),

\bar{x} - srednja vrijednost analiziranog parametra određenog razdoblja (mm, m³/s, cm).

Kod metode koraka najizraženija je veza jakosti i trajanja, slabija je veza jakosti i intenziteta, dok je statistički potpuno neznačajna veza trajanja i intenziteta [18, 24, 25].

3. Suša kontinentalnog dijela Republike Hrvatske

Navedene metode primijenjene su na mjesečne podatke količina oborina od 1981. do 2011. godine na 15 meteoroloških postaja kontinentalne Hrvatske iz redovite mreže Državnog hidrometeorološkog zavoda: Karlovac, Zagreb, Varaždin, Sisak, Križevci, Čazma, Bjelovar, Đurđevac, Daruvar, Slavonski Brod, Našice, Donji Miholjac, Osijek, Gradište i Vinkovci (od zapada prema istoku). Osim oborina, analizirana je i godišnja temperatura zraka na navedenim postajama istog razdoblja. Podatci o mjesečnim količinama oborina i temperaturama, koji su nedostajali u ratnim godinama na pojedinim postajama (Sisak, Osijek, Vinkovci, Našice, Čazma), interpolirani su metodom IDW (eng. *Inverse Distance Weighting* - IDW) pomoću računalnog programa QGIS-a. U svakom od ovih 5 nepotpunih nizova podataka količina oborina i temperatura zraka, broj interpoliranih podataka je ≤ 6 (<2%). Meteorološke postaje ovog dijela Hrvatske, na kojima je nedostajao veći broj mjesečnih vrijednosti količina oborina/temperatura zraka (Požega, Nova Gradiška, Krapina, Vukovar i Ilok), nisu uzete u obzir.

Srednje godišnje količine oborine prikazane u tablici 2. pokazuju prostornu raspodjelu godišnjih količina oborina ovog razdoblja koje opadaju od zapada prema istoku, ali po pojedinim postajama suma godišnjih količina oborine ne upućuje na trend smanjenja. Na zapadnom dijelu kontinentalne Hrvatske u većini gradova se uočava smanjenje godišnje količine oborina, i to najveće u Varaždinu, -19,7 mm/10 god., a na istočnom dijelu područja je evidentno povećanje srednje godišnje količine oborina u promatranom razdoblju, i to najveće na najistočnijoj analiziranoj postaji, u Vinkovcima, 41,6 mm/10 godina [27].

Istodobno se na svim postajama javlja povećanje srednje godišnje temperature zraka tijekom razdoblja od 1981. do 2011. godine. Povećanje srednje temperature zraka utječe i na povećanje potencijalne i stvarne evapotranspiracije i njihovog također pozitivnog trenda, što je dokazano analizom mnogo većeg broja meteoroloških postaja na području cijele Hrvatske [28]. Najveće povećanje temperature zraka je na području Zagreba (Maksimir) i iznosi 0,65 °C/10 god. U tablici 2. prikazane su geografske i

Tablica 2. Srednje godišnje oborine [mm] i srednje godišnje temperature zraka [°C] u razdoblju od 1981. do 2011. godine

Grad/meteorološka postaja (kratica)	Sjeverna geografska širina	OBORINE		TEMPERATURE ZRAKA	
		Srednja godišnja oborina [mm]	Trend [°C/10 god]	Srednja godišnja temperatura zraka [°C]	Trend [°C/10 god]
Karlovac (KA)	15°34'	1056,8	28,1	11,1	0,094
Zagreb-Maksimir (ZG)	16°02'	834,5	-11,6	11,2	0,65
Varaždin (VŽ)	16°20'	820,7	-19,7	10,6	0,51
Sisak (SI)	16°22'	908,5	33,5	11,4	0,52
Križevci (KR)	16°33'	778,9	-17,4	10,4	0,62
Čazma (ČA)	16°38'	826,4	24,2	11,1	0,46
Bjelovar (BJ)	16°51'	781,8	-0,2	11,2	0,62
Đurđevac (ĐU)	17°04'	817,0	-2,3	10,6	0,47
Daruvar (DA)	17°14'	890,5	7,7	11,1	0,18
Slavonski Brod (SB)	17°23'	756,1	20,0	11,1	0,52
Našice (NA)	18°06'	807,9	20,1	11,1	0,31
Donji Miholjac (DM)	18°10'	713,2	28,4	11,4	0,36
Osijek (OS)	18°34'	664,8	24,0	11,3	0,38
Gradište (GR)	18°42'	676,2	30,9	11,6	0,52
Vinkovci (VK)	18°49'	661,9	41,6	11,5	0,35

meteorološke karakteristike analiziranih postaja iz redovite mreže Državnog hidrometeorološkog zavoda.

Podatci o sumi godišnjih količina oborina, a posebice podatci o srednjim temperaturama zraka za analizirano razdoblje, upućuju na prisutnost pokazatelja suše i opravdanost njezinog analiziranja. Na slici 1. prikazan je prostorni raspored srednjih godišnjih količina oborina i temperatura zraka promatranog razdoblja. Radi boljšeg uvida u varijabilnost oborina tijekom vremena, ali i prostora, analizirano razdoblje podijeljeno je na 3 podrazdoblja (dekade), od 1981. do 1990., od 1991. do 2000. i od 2001. do 2011. godine.

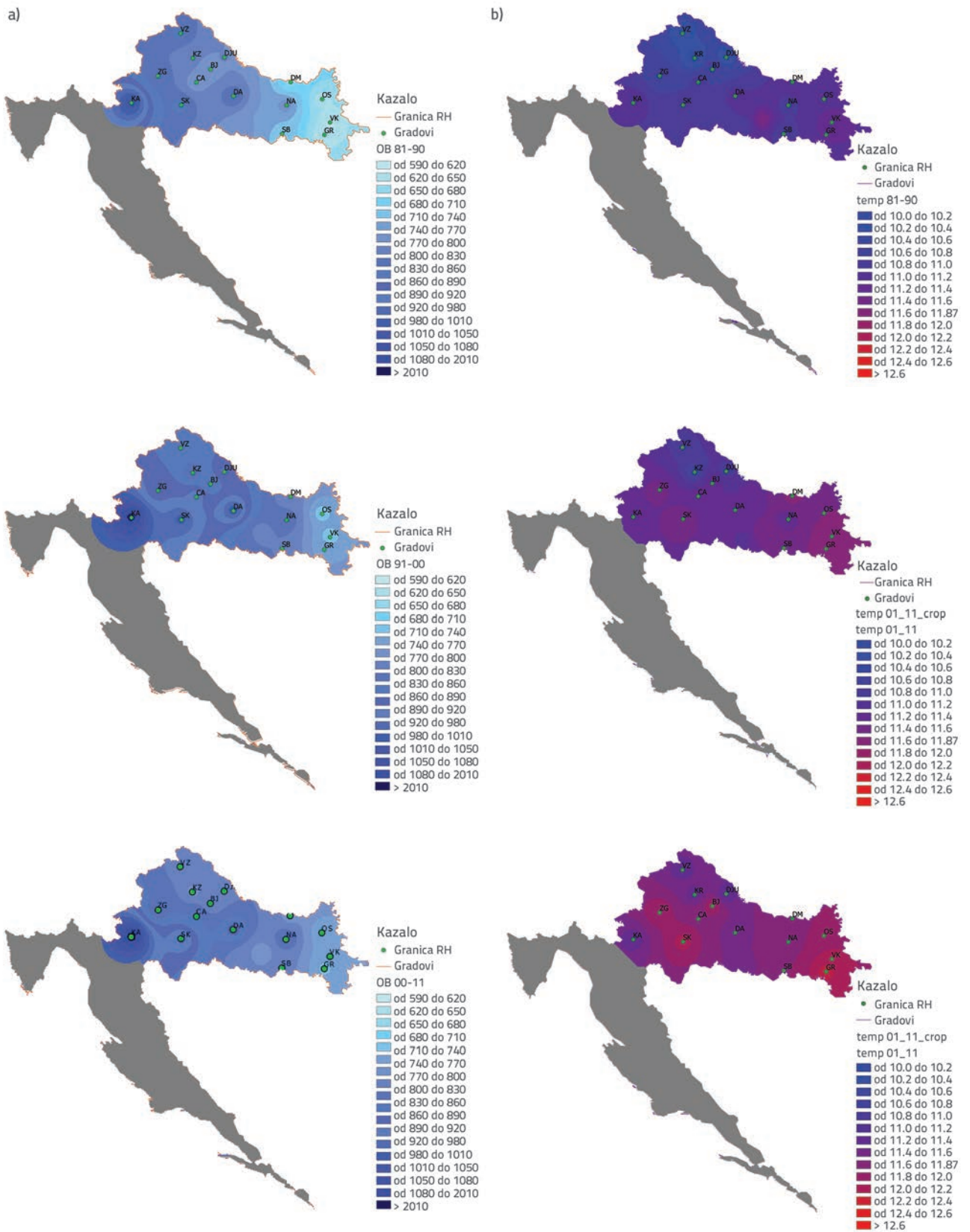
Primjenom različitih metoda za ocjenu suše, detaljnije će se analizirati ova pojava. Na slikama 2.a, 2.b, 2.c, i 2.d prikazane su relativne frekvencije sušnih mjeseci sumarno za svaku dekadu i za sva navedena mjesta kontinentalnog dijela Hrvatske prema indeksu standardiziranih oborina (SPI), metodi decila (DI), postotku od normalne oborine (PN) i indeksu anomalije oborina (RAI) za svako od podrazdoblja. Prve tri imaju podjelu na sedam karakterističnih uvjeta vlažnosti, metoda postotka od normale ima podjelu na pet karakterističnih uvjeta vlažnosti, a radi lakše usporedbe sve vrijednosti koje su jednake ili veće od 110 % od prosječne oborine se kategoriziraju kao vlažno razdoblje (tablica 1.). Na slici 2.a prema indeksu standardiziranih oborina u svakom podrazdoblju najveća je frekvencija mjeseci s prosječnom vlažnošću, i relativnom frekvencijom 0,72 (1981.-1990.), 0,68 (1991.-2000.) i 0,51 (2001.-2011.) Ekstremno vlažni mjeseci pojavljivali su se razmjerno rijetko, najviše u trećoj dekadi, kao i ekstremno sušni mjeseci s najvećom frekvencijom 0,032, također u trećoj dekadi. Tako razdoblje od 2000. do 2011. godine karakteriziraju ekstremno sušni i ekstremno vlažni

mjeseci. Umjereno sušni mjeseci najčešće su se pojavljivali u drugoj i trećoj dekadi.

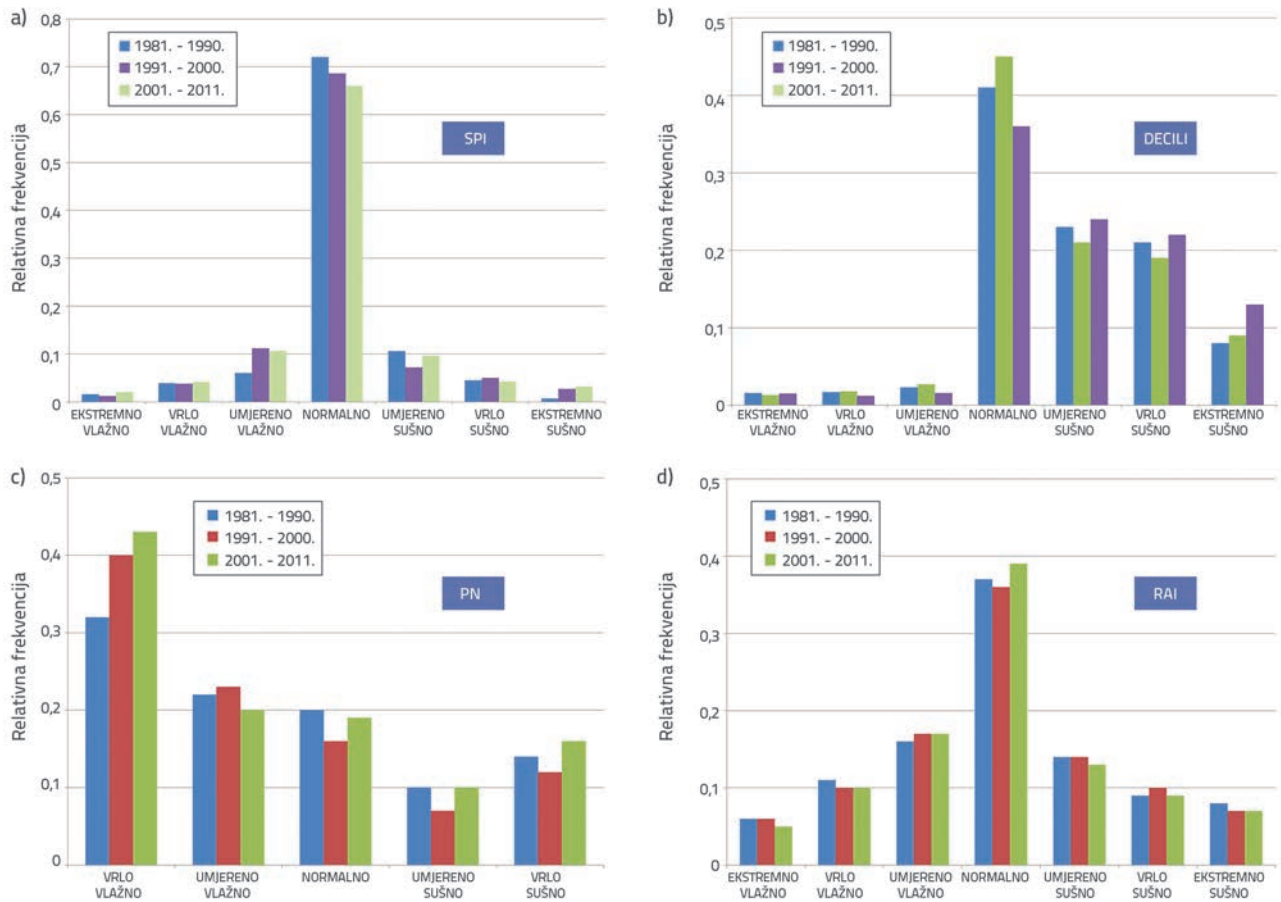
Prema metodi decila (slika 2.b), frekvencija prosječnih mjeseci u svakom podrazdoblju je najveća i iznosi 0,41 (1981.-1990.), 0,45 (1991.-2000.) i 0,36 (2001.-2011.). Pojavnost vlažnih mjeseci je gotovo zanemariva, ali je izrazita pojavnost suše svih razina, osobito umjereno sušnih i vrlo sušnih mjeseci. Ekstremno sušni mjeseci s frekvencijom 0,17 ističu se u trećem podrazdoblju od 2000. do 2011. godine.

Na slici 2.c, postotak od normalne oborine (PN), suprotno od prethodnih metoda, pokazuje najveću učestalost vlažnih mjeseci, posebice u razdoblju od 2001. do 2011. i iznosi čak 0,43 i prema tome značajno odstupa od rezultata dobivenih ostalim metodama. Umjereno vlažni mjeseci imaju relativnu frekvenciju od 0,20 do 0,23. Ekstremno sušni mjeseci najčešće se javljaju u podrazdoblju od 2000. do 2011. godine kao i prema indeksu standardiziranih oborina. Prema indeksu anomalije oborina (RAI), relativna frekvencija prosječnih mjeseci je najveća i iznosi od 0,36 do 0,39 u svim podrazdobljima. Frekvencija vlažnih mjeseci je od 0,42 do 0,43, a sušnih mjeseci 0,39. Niti jedno podrazdoblje se ne ističe po svojoj sušnosti ili vlažnosti (slika 2.d). Prema ovoj metodi, mjesečne oborine svih analiziranih lokacija kontinentalne Hrvatske cjelokupnog razdoblja imaju gotovo normalnu raspodjelu.

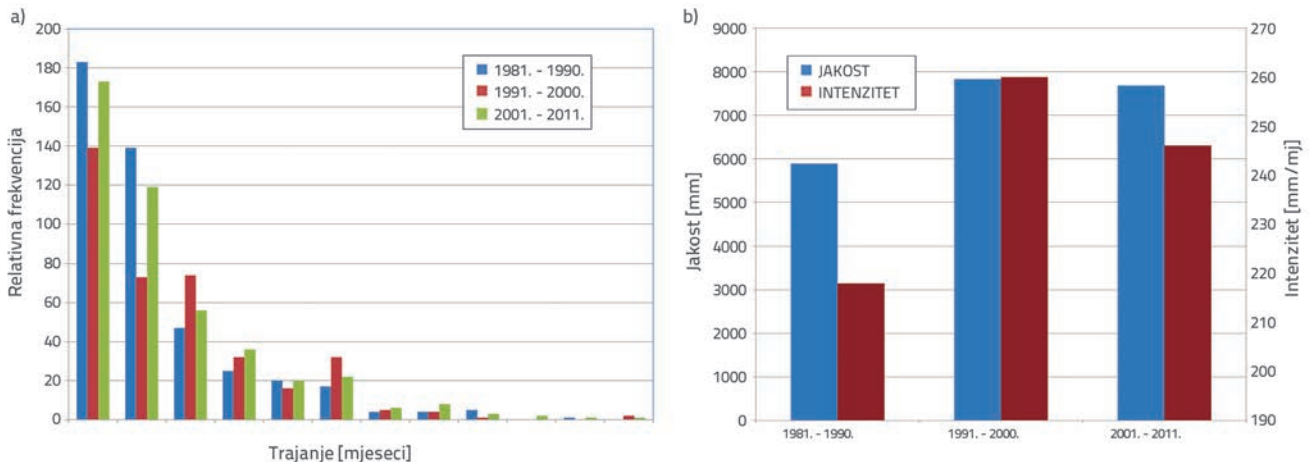
Metoda koraka razlikuje se prema pristupu problemu u odnosu na prethodno navedene i nema opisnu klasifikaciju razina sušnog odnosno vlažnog razdoblja. Na slici 3.a prikazana je učestalost suša prema trajanju za svako podrazdoblje. Najveća je učestalost suša kratkog trajanja, jednog i dva mjeseca i to u prvoj i trećoj dekadi. Suše trajanja 3, 6 i 7 mjeseci učestalije su bile u drugoj i trećoj dekadi. Prema jakosti suše, druga i treća dekada bile su sušnije, dok se prema



Slika 1. Prostorni raspored sume godišnjih oborina i srednjih godišnjih temperatura zraka za tri podrazdoblja, od 1981. do 1990., od 1991. do 2000. i od 2001. do 2011. godine



Slika 2. Relativna frekvencija vlažnih i sušnih godina prema: a) SPI; b) Decili; c) PN; d) RAI. Relativne frekvencije su prikazane za svako od podrazdoblja (1981.-1990., 1991.-2000. i 2001.-2011.)



Slika 3. Ocjena suša prema metodi koraka za svako podrazdoblje (1981.-1990., 1991.-2000. i 2001.-2011.): a) trajanje; b) jakost i intenzitet

intenzitetu suše ne ističe nijedna dekada (slika 3.b). Iako je pojavnost suša trajanja duljeg od 6 mjeseci vrlo mala, nije zanemariva zbog velikih šteta koje tako dugotrajna suša može izazvati. Na primjer, na području Donjeg Miholjca i Gradišta suša je trajala cijelu 2000. godinu, a na području Bjelovara cijelu 2011. godinu. Intenzitet suša ne ističe se niti u jednoj dekadi promatranog razdoblja.

Na slikama 2. i 3. kvantificirana je suša primjenom različitih metoda na mjesečne podatke količina oborina promatranog razdoblja podijeljenog na 3 dekade, ali sumarno za sva opažanja količina oborina bez obzira na kojoj su, od 15 analiziranih postaja, zabilježene. Prema svakoj od njih zastupljenost sušnih mjeseci po dekadama je dosta različito kvantificirana. Stoga je analizirana

prostorna raspodjela pokazatelja suše prema istim metodama ne bi li se lakše uočila njezina pojavnost u prostoru. Dekadni pristup je odabran jer se njezin utjecaj na bilancu voda, utjecaj klimatskih promjena na pojavnost suše i njezine posljedice na ekosustav u kraćim razdobljima (npr. jednoj godini) ne mogu uočiti.

4. Usporedba metoda

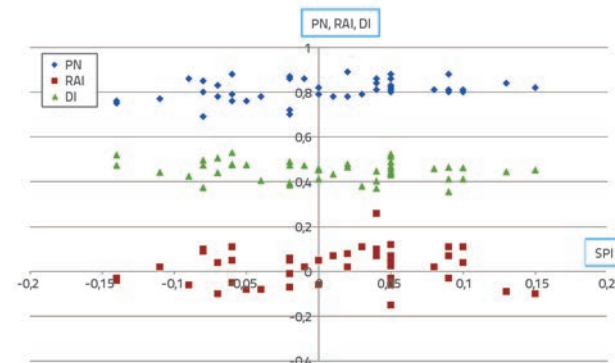
Usporedba analiziranih metoda provedena je za sve mjesece promatranog razdoblja i 15 meteoroloških postaja. Radi ilustracije provedenih metoda za ocjenu suše, na slikama 4.a i 4.b prikazani su rezultati za dvije meteorološke postaje, najzapadniju (Karlovac) i najistočniju (Vinkovci), za cijelo analizirano razdoblje od siječnja 1981. do prosinca 2011. godine.

U tablici 3. prikazani su koeficijenti korelacije pojedinih parova metoda. Veliku korelaciju pokazuje metoda indeksa standardiziranih oborina s ostalima analiziranim metodama (od 0,68 do 0,82), a potom indeksa anomalije oborina i postotka od normale ($r = 0,72$). Nema korelacije između metode decila i postotka od normale, a veza indeksa anomalije oborina i metode decila ($r = 0,35$) ocjenjuju se kao slaba.

Tablica 3. Koeficijenti korelacije (r) analiziranih metoda

	SPI	DI	RAI	PN
SPI	1	0,77	0,68	0,82
DI		1	0,35	0,06
RAI			1	0,72
PN				1

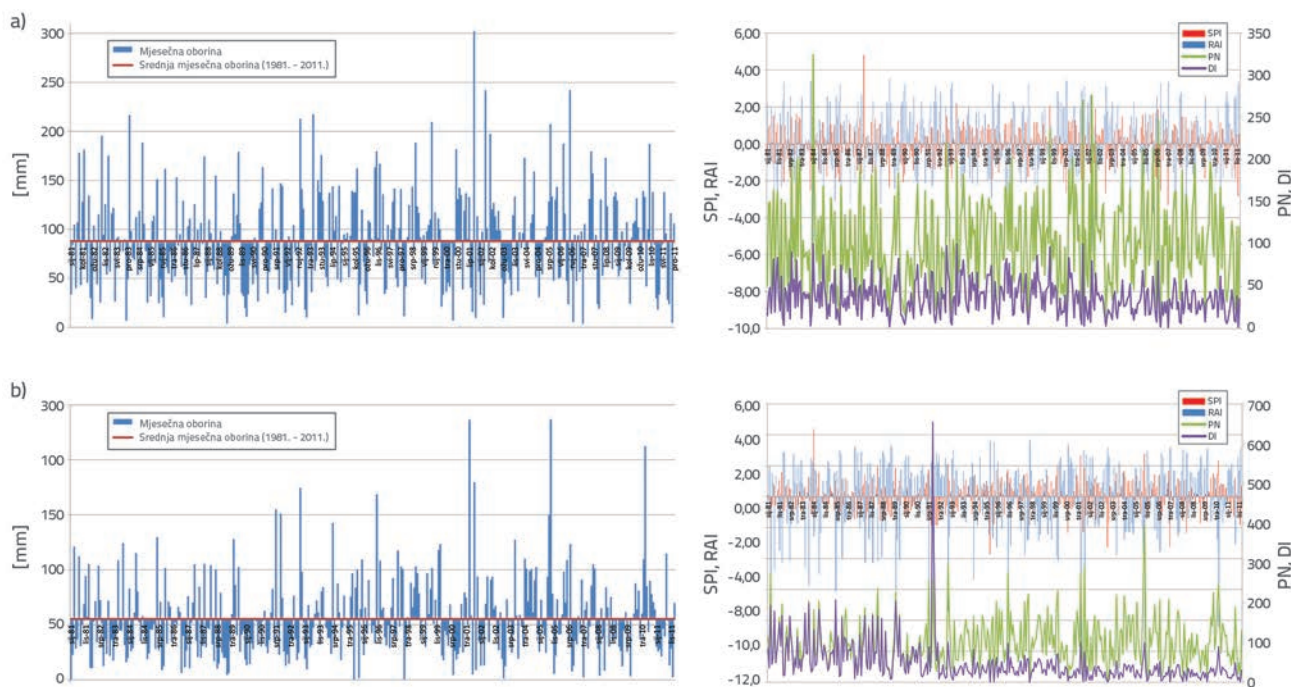
Grafički prikaz odnosa indeksa standardiziranih oborina i metode decila, indeksa anomalije oborina i postotka od normale predložen je na slici 5. Vidljivo je da je izrazitija korelacija kod normalnih uvjeta vlažnosti i suša manjeg intenziteta nego kod suša ekstremnijih razmjera.



Slika 5. Odnos metode SPI i ostalih analiziranih metoda PN, RAI i DI

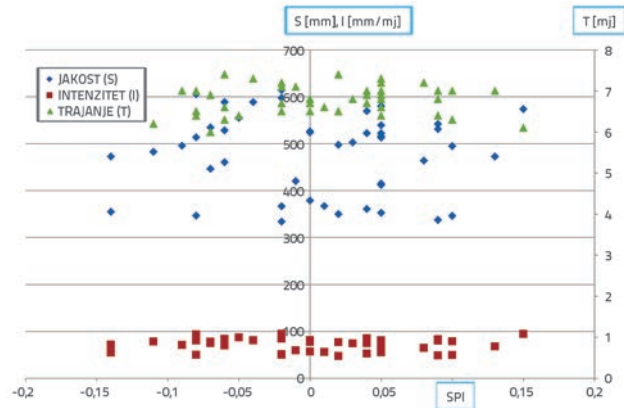
Prikazani rezultati pokazuju opravdanost primjene indeksa standardiziranih oborina, ali i ostalih metoda na području kontinentalne Hrvatske. Indeks standardiziranih oborina ima vrlo slabu korelaciju s trajanjem suše ($r = 0,14$), intenzitetom suše ($r = 0,05$) i jakošću suše ($r = 0,024$) prema metodi koraka (slika 6.).

Kako je prethodno navedeno, metodu koraka čine trajanje, intenzitet i jakost suše. Međusobne veze ove kategorizacije suše prikazane su u tablici 4. Najizrazitija je veza jakosti i intenziteta, dok je slabija, ali još uvijek značajna, veza trajanja i intenziteta, a veze jakosti i trajanja



Slika 4. Ocjena suše prema svim analiziranim metodama u razdoblju od siječnja 1981. do prosinca 2011. godine: a) Karlovac; b) Vinkovci

gotovo nema. Ovi rezultati nisu u skladu s publiciranim rezultatima gdje se obično ističe čvrsta veza jakosti i trajanja. Tumačenje je u pojavnosti manje jakih suša dužega trajanja.



Slika 6. Odnos metoda SPI i trajanja, jakosti i intenziteta suše prema metodi koraka

Tablica 4. Koefficient korelacije (r) jakosti (S), trajanja (T) i intenziteta (I) suše prema metodi koraka

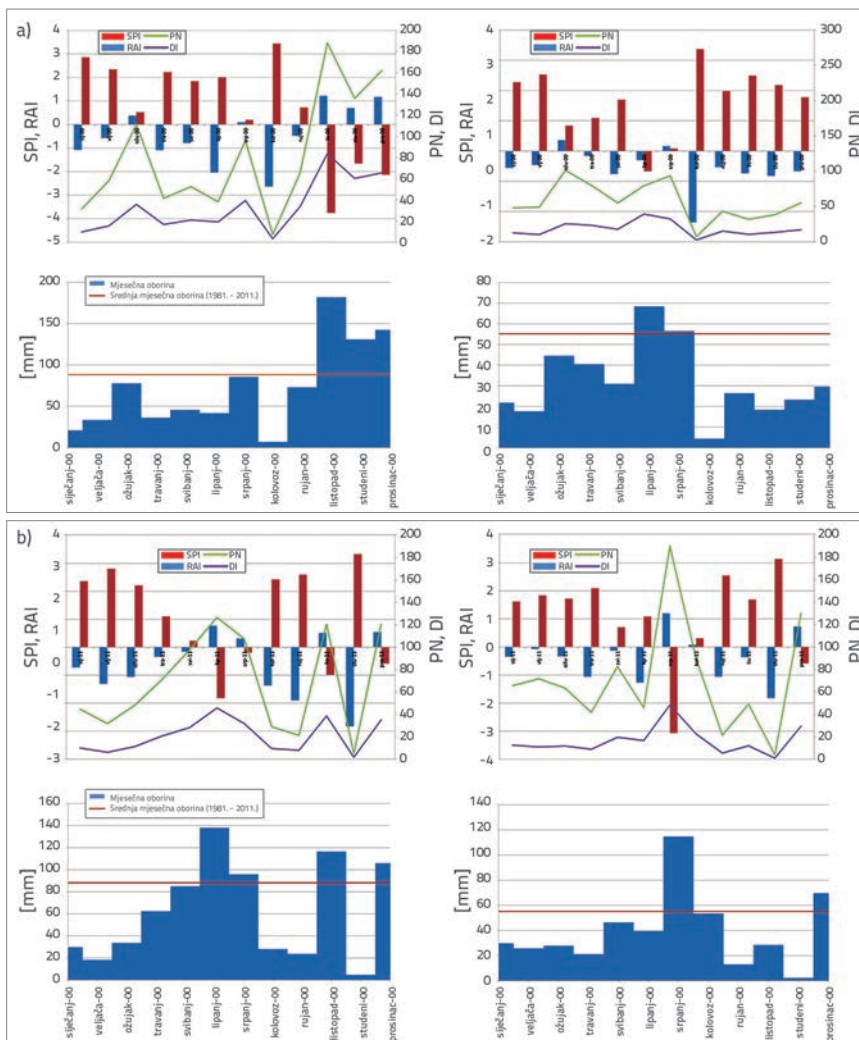
	S	T	I
S	1	0,07	0,96
T		1	0,47
I			1

Analizirane metode ne pokazuju konzistentnost niti u kvantificiranju najsušnijih godina analiziranog razdoblja od 1981. do 2011. No, ističu se 2000. i 2011. godina koje se po većini metoda mogu smatrati godinama s izrazitom sušom. Za ilustraciju su ponovno uzete za primjer meteorološke postaje Karlovac i Vinkovci, a ocjene suše prema svim analiziranim metodama prikazane su po mjesecima za 2000. i 2011. godinu (slika 7.a i 7.b.). U 2000. godini, u Karlovcu je trajanje suše bilo 9 mjeseci, a u Vinkovcima 10 mjeseci i izrazitije jakosti, dok je u 2011. godini trajanje suše u Karlovcu

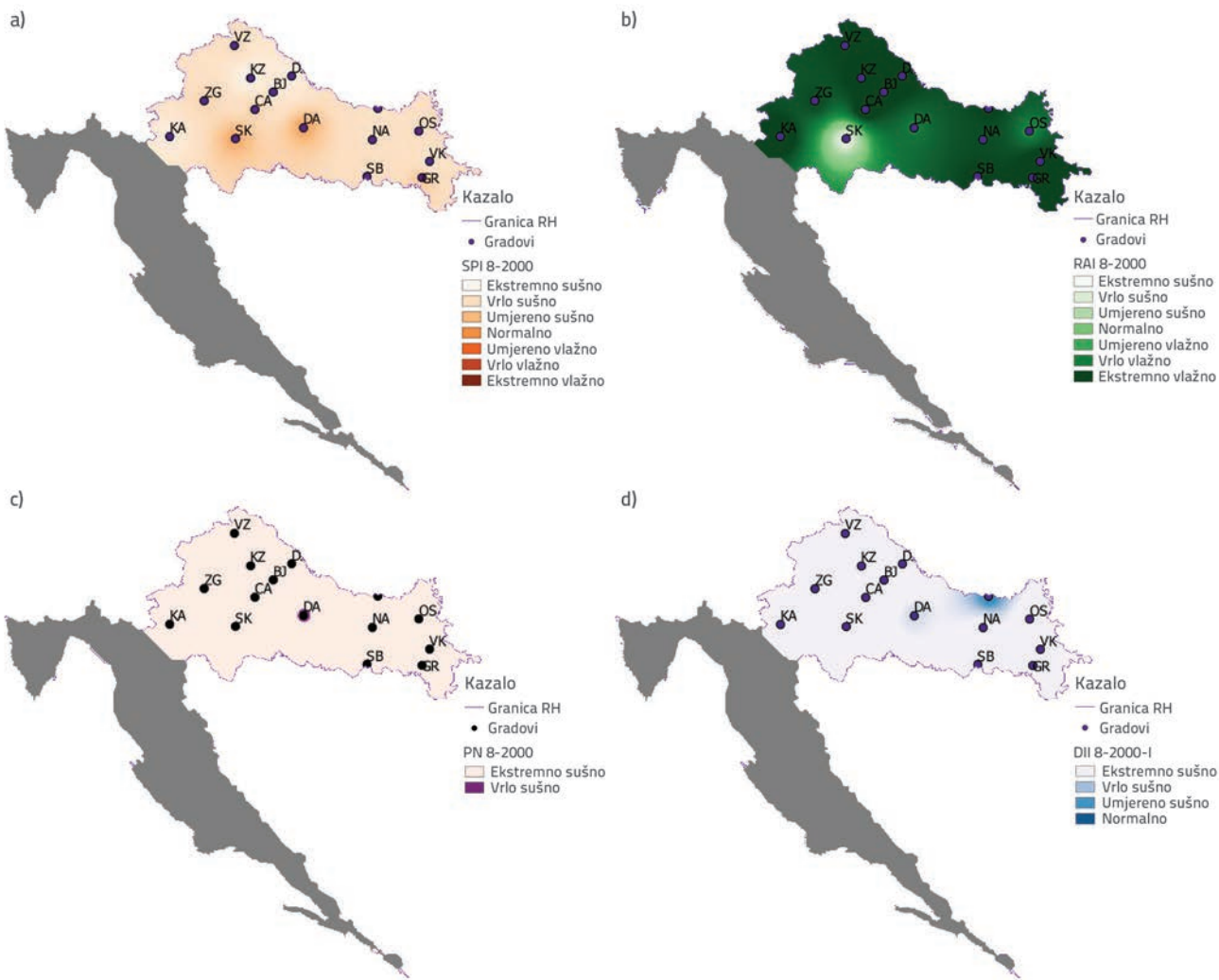
bilo 8 mjeseci, u Vinkovcima također 10 mjeseci, ali slabije jakosti. Prema SPI, decilima i postotku od normalne oborine, također se uočavaju sušna razdoblja izrazitija u Vinkovcima 2000. godine i Karlovcu 2011. godine. Prema RAI, na ove dvije meteorološke postaje u 2000. i 2011. godini suša nije tako izražena, osim u pojedinim mjesecima. Prostorni prikaz najsušnijeg mjeseca u 2000.godini, kolovoza, dan je na slici 8. prema različitim metodama.

Prema standardiziranom indeksu oborina (SPI) u kolovozu 2000.godine, suša koja je zahvatila cijelo područje kontinentalne Hrvatske bila je vrlo velika do umjerena (slika 8.a). Prema indeksu anomalije oborina (RAI) kolovoz 2000. godine bio je normalno do umjereno vlažan, osim oko Siska (slika 8.b). Prema postotku od normalne oborine (PN) i metodi decila (DI) suša je bila ekstremna (slika 8.c., slika 8.d). U 2011. godini najsušiji mjesec bio je studeni, intenziteta vrlo sličnog kao i u kolovozu 2000. godine.

Na slici 9. prikazane su najsušnije godine prema analiziranim metodama za ocjenu suše za sve meteorološke postaje na području kontinentalne Hrvatske. Prema svim metodama, 2000. i 2011. godina ocijenjene su kao najsušnije za većinu meteoroloških postaja promatranog područja, a zatim slijedi 2003. godina.



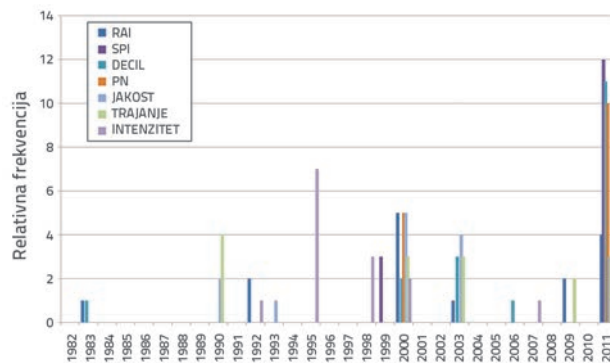
Slika 7. Ocjena suše prema svim analiziranim metodama za najsušnije godine: a) Karlovac i Vinkovci (siječanj - prosinac 2000. godine); b) Karlovac i Vinkovci (siječanj - prosinac 2011. godine)



Slika 8. Prostorni prikaz suše na kontinentalnom dijelu Hrvatske mjeseca kolovoza 2000. godine: a) SPI; b) RAI; c) PN; d) DI

U 2000. godini godišnja količina oborina kretala se od 317 mm u Osijeku do 748 mm u Sisku, a u 2011. godini godišnja količina oborina kretala se od 388 mm u Bjelovaru do 742 mm u Karlovcu.

U razdoblju od 1981. do 2011. može se četrnaest godina okarakterizirati da su sušne, primjenom navedenih metoda, što ne znači da se u ostalim godinama nisu pojavljivale suše kraćeg trajanja. U 2000. i 2011. godini na većini meteoroloških postaja zabilježena je najveća suša. U 2000. godini izrazitija suša je bila u istočnijim dijelovima kontinentalne Hrvatske (Našice, Osijek, Slavonski Brod, Donji Miholjac, Vinkovci, Gradište), dok je 2011. godine suša bila izrazitija u zapadnijim dijelovima (Bjelovar, Čazma, Daruvar, Karlovac, Križevci, Sisak, Đurđevac, Varaždin, Zagreb). No, može se reći da je te dvije godine suša zahvatila cijeli kontinentalni dio Hrvatske, od ekstremnog do umjerenog intenziteta, a njihovo trajanje bilo je od 8 do 12 mjeseci, ovisno o lokaciji, ali i metodi po kojoj je suša ocijenjena (slika 7.a i 7.b).



Slika 9. Učestalost sušnih godina prema pojedinim metodama

4. Zaključak

Za područje kontinentalne Hrvatske, primjenom podataka o količinama oborina na 15 meteoroloških postaja u razdoblju od 1981. do 2011. godine, primijenjene analize za ocjenu

suše potvrdile su složenost pojave suše kao i različitost metoda za njezinu kvantifikaciju. Indeks standardiziranih oborina, metoda decila, postotak od normalne oborine, indeks anomalije oborina i metoda koraka su jednoparameterske metode u širokoj primjeni u svijetu, na lokacijama različitih geografskih i klimatoloških karakteristika. Njihova usporedba pokazala je mogućnost primjene svih analiziranih metoda, što pokazuju značajni koeficijenti korelacije indeksa standardiziranih oborina i metode decila, postotka od normalne oborine i indeksa anomalije oborina, dok je korelacija indeksa standardiziranih oborina i jakosti, trajanja i intenziteta suše prema metodi koraka vrlo slaba. Također nije potvrđena veza između jakosti i trajanja suše. Analiza suša po podrazdobljima 1981.-1990., 1991.-2000. i 2001.-2011. pokazuje da je prema indeksu standardiziranih oborina i postotku od normalne oborine najsušniji razdoblje od 1981. do 1991. godine, prema jakosti i trajanju suše razdoblje od 2001. do 2011. godine, a prema ostalim metodama nema izrazitih razlika u kvantificiranju suše pojedinih podrazdoblja.

Također su prema većini metoda najsušniji godine 2000. i 2011. Prostorno je suša, prema intenzitetu, 2000. godine jače zahvatila istočni dio kontinentalne Hrvatske, a 2011. godine zapadni dio, no može se reći da je tih godina suša različitog intenziteta zahvatila cijelu kontinentalnu Hrvatsku. Suše su ekstremna i složena hidrološka pojava koja zbog svojih negativnih posljedica za okoliš i gospodarstvo, posebice poljoprivredu, zaokuplja sve veću pažnju znanstvenika. Povećanje potreba za vodom radi navodnjavanja poljoprivrednog zemljišta, osiguranje ekološki prihvatljivih protoka i dostatnih količina vode za sigurnu vodoopskrbu, ali i povećana ugroženost kvalitete vode tijekom malovodnih razdoblja, čine upravljanje vodnim resursima sve složenijim. U ovom trenutku ne može se niti jedna metoda istaknuti kao apsolutno pouzdana, ali se prema dobivenim rezultatima mogu preporučiti skupine metoda primjenjivih za određeno područje, u ovom slučaju kontinentalni dio Hrvatske, a to su indeks standardiziranih oborina, metoda decila, indeks anomalije oborina i postotak od normalne oborine.

LITERATURA

- [1] Piccarreta, M., Capolongo, D., Boenzi, F.: Trend Analysis of Precipitation and Drought in Basilicata from 1923-2000 within Southern Italy Context, *International Journal of Climatology* 24, pp. 907-922, 2004., doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1038>
- [2] Mishra, A.K., Singh, V.P.: A review of drought concept, *Journal of Hydrology* 391, pp. 202-216, 2010., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- [3] Wanders, N., van Lannen, H.A.J., van Loon, A.F.: Indicators for Drought Characterization on a Global Scale, *Technical Report No.24*, 2010.
- [4] Morid, S., Smakhtin, V., Moghaddasi, M.: Comparison of Seven Meteorological Indices for Drought Monitoring in Iran, *International Journal of Climatology*, 26, pp. 971-985, 2006., doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1264>
- [5] Byun, H.R., Wilhite, D.A.: Objective Quantification of Drought, *Journal of Climate*, 9, 12, pp. 2747-2756, 1999., doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2)
- [6] Palmer, W.C.: Meteorological Drought, *Research Paper No.45*, US Department of Commerce Weather Bureau, Washington DC, 1965.
- [7] McKee, T.B., Doeskin, N.J., Kleist J.: Drought Monitoring with Multiple Time Scales, *Conference of Applied Climatology*, American Meteorological Society, Boston, pp. 179-184, 1995.
- [8] Gibbs, W.J., Maher, J.V.: Rainfall deciles as drought indicators, *Bureau of Meteorology Bulletin*, 48, Melbourne, 1967.
- [9] Wu, H., Hayes, M.J., Weiss, A., Hu, Q.: An Evaluation of the Standard Precipitation Index, the China-Z index and the Statistical Z-score, *International Journal of Climatology*, 6, 21, pp. 745-758, 2001., doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.658>
- [10] Yevjevich, V.: An Objective Approach to Definitions and Investigations of Continental Hydrology Drought, Hydrology Paper No.23, Colorado State University., Fort Collins, 1967
- [11] van Rooy, M.P.: A Rainfall Anomaly Index Independent of Time and Space, *Notos* 14, pp. 43-48, 1965.
- [12] Alatisse, M.O., Ikumawoyi, O.B.: Evaluation of Drought from Rainfall Data for Lakoja. A Confluence of two Major Rivers, *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 10 (1), 2007.
- [13] Oladipo, E.O.: A Comparative Performance Analysis of Three Meteorological Drought Indices, *Journal of Climatology* 6, 5, pp. 655-664, 1985., doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3370050607>
- [14] Keyantash, J.: The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices, *Bull.Amer.Meteor.Society* 83 (8), pp. 1167-1180, 2002., doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(2002\)083<1191:TQODAE>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(2002)083<1191:TQODAE>2.3.CO;2)
- [15] Heim, R.R.: A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States, *Bulletin of American Meteorological Society*, 83 (8), pp. 1149-1165, 2002. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(2002\)083<1149:AROTDI>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(2002)083<1149:AROTDI>2.3.CO;2)
- [16] Byun, H.R., Kim, D.W.: Comparing the Effective Drought Index and Standard Precipitation Index, *CIHEM*, pp. 85-89, 2010.
- [17] Kim, D.W., Byun, H.R., Choi, K.S.: Evaluation, Modification and Application of Effective Drought Index to 200 Year Drought Climatology of Seoul, Korea, *Journal of Hydrology*, 378 (1-2), pp. 1-12, 2009., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.021>
- [18] Bonacci, O.: Hydrological Identification of Drought, *Hydrological Processes*, 7 (3), pp. 249-262, 1993., doi: <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.3360070303>

- [19] Cindrić, K., Kalin, L.: Analiza mogućnosti i prognoze suše na području Hrvatske, *Hrvatske vode* 79/80, 20, pp. 43-50, 2012.
- [20] Mihajlović, D.: Monitoring the 2003-2004 Meteorological Drought over Pannonian part of Croatia, *International Journal of Climatology*, 26, pp. 2213-2225, 2006., doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1366>
- [21] Ljubenkov, I., Bonacci, O.: Utvrđivanje i određivanje suše na otoku Korčuli, *Hrvatske vode* 77, 19, pp. 181-194, 2011.
- [22] Smakhtin, V.U., Hughes, D.A.: Review, Automated Estimation and Analyses of Drought Indices in South Asia, Working Paper 83, *Drought Series Paper* 1, 2004.
- [23] <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>
- [24] Ali M.G., Younes, K. Esmaeil, A, Fotemech, T.: Assessment of Geostatistical Methods for Spatial Analysis of SPI and EDI Drought Indices, *World Applied Sciences Journal* 15 (4), pp. 474-482, 2011
- [25] Bonacci, O.: *Ekohidrologija vodnih resursa i otvorenih vodotoka*, GAF Split, 2003.
- [26] Tallaksen, L.M., van Lanen, H.A.J.: *Hydrological Drought Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*, Elsevier, 2004
- [27] Bosak, M.: Analiza suše i potrebitost navodnjavanja kontinentalnog dijela Hrvatske, diplomski rad, Građevinski fakultet Osijek, 2013.
- [28] Pandžić, K., Trninić, D., Likso, T., Bošnjak, T.: Long-term variations in water balance components for Croatia, *Theoretical and Applied Climatology*, (0177.798X)95, pp. 39-51, 2009.