

ГЕОХАЗАРД У СРБИЈИ У 21. ВЕКУ – ЗНАЊЕ ЈЕ НАЈБОЉИ БЕДЕМ ПРОТИВ СТИХИЈЕ

ГЕОХАЗАРД У СРБИЈИ У 21. ВЕКУ
– ЗНАЊЕ ЈЕ НАЈБОЉИ БЕДЕМ ПРОТИВ СТИХИЈЕ

SERBIAN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS

LECTURE SERIES

Book 5

GEOHAZARD IN SERBIA
IN THE 21st CENTURY

– KNOWLEDGE IS THE BEST BASTION
AGAINST THE NATURAL DISASTERS

Accepted at the 4th meeting of the Department of Mathematics,
Physics and Geosciences on 24 May 2019

Editor
VLADICA CVETKOVIĆ
Corresponding Member of SASA

BELGRADE 2019

СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ

ЦИКЛУС ПРЕДАВАЊА

Књига 5

ГЕОХАЗАРД У СРБИЈИ
У 21. ВЕКУ

– ЗНАЊЕ ЈЕ НАЈБОЉИ БЕДЕМ
ПРОТИВ СТИХИЈЕ

Примљено на IV скупу Одељења за математику, физику и гео-науке
од 24. маја 2019. године

Уредник
ВЛАДИЦА ЦВЕТКОВИЋ
дописни члан САНУ

БЕОГРАД 2019

Издаје
Српска академија наука и уметности
Београд, Кнеза Михаила 35

Лектура и коректура
Невена Ђурђевић
Снежана Крсчић-Букарица

Превод резимеа
Аутори

Технички уредник
Никола Стевановић

Тираж 350 примерака

Штампа
ЈП *Службени гласник*

ISBN 978-86-7025-844-0

© Српска академија наука и уметности 2019

САДРЖАЈ

Владица Цветковић, <i>Уводна реч</i>	7
Ана Младеновић, Славица Радовановић, <i>Сеизмички hazard у Србији</i>	11
Ana Mladenović, Slavica Radovanović, <i>Seismic hazard in Serbia</i>	22
Зоран Стевановић, <i>Процена ризика од несигурности воде за пиће у Србији</i>	25
Zoran Stevanović, <i>Risk assessment of drinking water shortage in Serbia</i>	44
Славиша Трајковић, <i>Просторно-временске карактеристике суша у Србији</i>	45
Slaviša Trajković, <i>Spatiotemporal characteristics of droughts in Serbia</i>	64
Биљана Аболмасов, <i>Hazard од клизашница у Србији у 21. веку</i>	65
Biljana Abolmasov, <i>Landslide hazard in Serbia in the 21st century</i>	87
Видојко Јовић, <i>Загађење земљишта – узроци и последице</i>	89
Vidojko Jović, <i>Soil pollution – causes and consequences</i>	97

Дејан Прелевић, <i>Да ли је вулкански хазард ђрејња за ђодручје Балканској ђолуосјрва?</i>	99
Dejan Prelević, <i>Is volcanic hazard a threat for the area of Balkan Peninsula?</i>	119
Слободан Марковић, <i>Климајске ђромене – ђеојерсјекјива</i>	121
Slobodan Marković, <i>Climate changes – geoperspective</i>	129

УВОДНА РЕЧ

Зборник радова под насловом: „Геохазард у Србији у 21. веку – знање је најбољи бедем против стихије“ представља резултат истоименог циклуса предавања, који је у периоду од априла до јуна 2018. године одржан у Српској академији наука и уметности. Посебним циклусима предавања САНУ показује жељу да појача своју друштвену улогу тиме што би, поред великог броја активности у којима се промовишу искључиво врхунски научни резултати, организовала скупове посвећене неким од најважнијих проблема савременог српског друштва. Садржај предавања ових посебних циклуса подједнако је усмерен како експертима тако и широком аудиторијуму, другим речима, најсавременија научна знања пласирају се на начин да њихов значај за заједницу буде највидљивији.

У оквиру циклуса „Геохазард у Србији у 21. веку – знање је најбољи бедем против стихије“ одржано је укупно седам предавања. Њима су тематски обухваћени ако не сви, онда сигурно најважнији геолошки хазарди с којима се наш простор може суочити у овом веку. Неки од ових геохазарда су нам нажалост и „блиски“ и познати, попут земљотреса и клизишта, неки нам тек „куцају на врата“, као што су проблеми недостатка квалитетне воде или озбиљног загађења земљишта, док неке од приказаних гео-опасности доживљавамо мање узнемирујућима зато што су (само привидно) далеко од нас, било у простору, на пример вулкани, или у времену, као што су глобалне промене климе.

У првом раду Зборника, А. Младеновић и С. Радовановић приказују најважније аспекте сеизмичког хазарда у Србији. На разумљив, али научно савремен начин, у раду се објашњава зашто се код нас догађају релативно јаки земљотреси, премда подручје Србије није близу места генерисања највеће количине тектонске енергије у региону. Посебна пажња поклања се чињеници да је штета коју ови земљотреси праве несразмерно велика. Рад пружа и осврт на проблеме у дефинисању сеизмичког хазарда на територији наше земље, наглашавајући притом који се стандарди морају поштовати при прикупљању података и примењивању методологије за ваљану процену хазарда.

У раду „Процена ризика од несташице воде за пиће у Србији“ аутор З. Стевановић описује тренутно стање водних ресурса у Србији, при чему многе податке приказује и у историјском контексту. На тај начин из рада је могуће сазнати не само какав је *status preasens* већ и о каквим трендовима је реч, као што је, на пример, дуготрајно повећање капацитета централизованог водоснабдевања у последњих шездесет година или осетно смањење учешћа подземних вода у снабдевању водом у Србији. Аутор закључује да Србија „припада групи земаља Европе са довољним ресурсима подземних и површинских вода за дугорочно задовољавање потреба становништва у пијаћој води, као и потреба у области индустрије, енергетике, наводњавања пољопривредних површина.“

Вода је и у фокусу трећег прилога у овом Зборнику. У оригиналном раду „Просторно-временске карактеристике суша у Србији“ аутор С. Трајковић истиче да су штете од суше по правилу веће од оних које настају другим природним хазардима у Србији. На пример, штета од суше из 2012. године процењена је на милијарду и осамсто милиона евра, што за сто милиона евра надмашује ону изазвану колосалним поплавама из 2014. године. Аутор приказује резултате вишегодишњих истраживања на развоју хидроинформационог система за праћење и правовремену најаву суше. На основу приказаних података, у Србији су издвојена три региона: северни, западни и јужни, који се међусобно разликују према угрожености од суше, као и по мерама за ублажавање последица суше.

Четврти прилог се бави клизиштима. У свом прегледном раду под насловом „Хазард од клизишта у Србији у XXI веку“ ауторка Б. Аболмасов даје процену „да је 16–20% територије Србије под активним или умиреним процесом клижења“, при чему детаљно образлаже најважније узроке ових природних појава. У раду се даје критички осврт на тренутну праксу која се тиче уношења података у национални катастар клизишта, и изводи закључак да због незадовољавајућег стања у вези с катастром, тренутно није ни могуће дати најтачнију процену хазарда од клизишта у Србији.

Рад „Загађење земљишта – узроци и последице“ академика Видојка Јовића тиче се све присутнијег проблема загађења земљишта у нашем подручју. У раду су приказане информације о основним узроцима и типовима загађења (рударство, индустрија и друго) и дати примери угроженог земљишта у различитим подручјима Србије.

У прилогу под насловом „Да ли је вулкански хазард претња за подручје Балканског полуострва?“ Д. Прелевић најпре пружа основне информације о унутрашњој динамици наше планете, а затим, без непотребних детаља, али уз излагање најважнијих научних чињеница, објашњава како вулкани настају и зашто се појављују само у (геолошки) одређено време и на одређеном месту. Из ових информација следи приказ тренутне ситуације хазарда од вулканских ерупција за подручје Србије, да би у закључном делу била описана три могућа сценарија по којима би подручје Балканског полуострва могло да буде угрожено вулканским ерупцијама.

Последњи рад у Зборнику носи наслов: „Климатске промене – геоперспектива“, а његов аутор је С. Б. Марковић, дописни члан САНУ. У свом прегледном раду аутор анализира климатске варијабилности на нашој планети у односу на концентрацију гасова који изазивају такозвани ефекат стаклене баште, и то за читав период кенозоика (последњих 65,5 милиона година). Аутор закључује да се „тренутно налазимо у последњој топлој фази (интерглатијалу) квартарног леденог доба, која је још увек далеко хладнија од палеоценско-еоценског климатског максимума“. У својим закључним поглављима аутор даје и низ личних осврта на тренутне проблеме у сагледавању будућих климатских промена.

Према свему што је садржано у наведеним прилозима овај Зборник у потпуности испуњава мисију посебних циклуса предавања у САНУ. У њему су разматрана научна питања од чијих одговора не зависи само напредак једне струке нити читаве науке, већ опстанак свих нас, и зато то знање никако не сме да остане само експертима. На тај начин, САНУ доприноси путу Србије ка модерној заједници, у којој научници слушају једни друге и раде заједно на најважнијим питањима, а знање до којих они долазе бива употребљено на прави начин.

Два аспекта овог Зборника желим посебно да истакнем. Први се тиче његове актуелности. Довољан је и летимичан поглед на неко од средстава информисања да би се видело да је оно што наши најпозванији научници тематизују у овом Зборнику најтешње повезано с нашим свакодневним животом. О томе сведоче наслови, попут: „Zrenjanin: Zašto je voda žuta?“ (<https://www.danas.rs/drustvo/zrenjanin-zasto-je-voda-zuta/>), „Klimatske promene: Nivo mora porašće za dva metra“ (<https://www.bbc.com/serbian/lat/svet-48349291>) или „Italijanski vulkan Etna se ponovo aktivirao“ (<https://www.slobodnaevropa.org/a/29976226.html>). Чак и када узмемо у обзир да вести у данашњој, интернетом контролисаној медијској комуникацији, имају увек нешто драматичнији тон, остаје утисак изражене актуелности. Најзад, истовремено с приређивањем за штампу овог зборника у којем се као пример подручја угроженог клизиштима приказује карта Крупња (стр. 74, слика 2), исто подручје бива поново директно погођено бујичним поплавама, а на територији Крупња је на снази ванредна ситуација и влада непрестана опасност од активирања клизишта.

Други аспект је везан за чињеницу да се Зборник одликује високим нивоом критичког мишљења. Осим тога што се у многим радовима указује на лоше стање у Србији када је реч о предусловима за процену хазарда, Зборник доноси и контрастне погледе на једну од данас најосетљивих друштвено-научних тема као што је човеков утицај на климатске промене.

Иако ни као научници нисмо у стању да спречимо, па ни да у детаљима предвидимо велике поплаве и земљотресе, постоји велики број чињеница које су нам веома добро познате, на пример, да се не сме градити свуда и на било који начин. Знамо да ће и вода и обрадиво земљиште бити стратешки ресурси у блиској будућности и да се то мора узети у обзир у одлукама које

доносимо данас, а чије ћемо последице осетити већ сутра. Познато нам је да у Србији нема вулкана који могу бити активни у наредним миленијумима, али истовремено знамо шта се може очекивати од веома јаких ерупција у свету, које ће неминовно уследити. Од седам великих ерупција од последњег леденог доба до данас само се једна догодила када је на земљи живело више од једне милијарде људи, а постоје предвиђања да ће само до краја овог века на земљи живети 12 милијарди људи. Ако би се поновила само једна колосална ерупција, попут оне на месту данашњег језера Тоба на Суматри од пре око 74 хиљаде година, то би људску расу могло да врати на предцивизацијски ниво.

Све што знамо као научници и истраживачи мора бити што пре усвојено од стране целокупне заједнице. Овај Зборник представља само једну од многих активности Српске академије наука и уметности које имају за циљ да научна знања што пре допру до свих, а нарочито до оних који доносе најважније одлуке за читаво друштво.

Владица Цветковић,
дописни члан САНУ

ПРОСТОРНО-ВРЕМЕНСКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ СУША У СРБИЈИ

СЛАВИША ТРАЈКОВИЋ*

А п с т р а к т. – Суша је веома комплексна појава која утиче на водне ресурсе, земљиште, пољопривредну производњу, животну средину, економију, као и на друштво у целини. У овом раду, процена просторно-временских карактеристика суше заснива се на подацима о месечним падавинама са 28 станица у Србији, за период 1948–2012. Анализа главних компоненти и анализа кластера је показала да у Србији, према угрожености од суше, постоје следећи региони: регион Р1 – север Србије, регион Р2 – запад Србије и регион Р3 – југ Србије. Регион Р2 има месечне вредности падавина изнад просека, док су региони Р1 и Р3 са вредностима падавина испод просека Србије. Појава суше анализирана је на основу SPI-12 класа суше. Нормалној класи припада 69% анализираних година, 16% спада у године са вишком падавина, суша се јавља у 15% година и то: умерена суша у 8%, јака суша у 5% и екстремна суша у 2% година. Већа учесталост суше забележена је од 1990. године. Тренд повећања евапотранспирације показује да се у будућности може очекивати већа учесталост суше. У раду се предлаже укључивање нових индекса у мониторинг суше (SPEI, WSVI). Такође, предлаже се коришћење модификоване Харгривс и температурне Пенман-Монтеј методе за прорачун евапотранспирације у индексима суше (SPEI, WSVI, RDI).

Кључне речи: индекси суше, падавине, евапотранспирација, водни биланс, Србија

1. УВОД

Значајан недостатак падавина, који се дефинише као одступање падавина од нормале, односно од просека који је установљен за одређену област и дефинисани временски период, је основни узрок настанка суше. Суша може дуго да траје, да захвати велика подручја и ретко изазива људске губитке. По тим својим карактеристикама се значајно разликује од других елементарних непогода које се јављају нагло и ненајављено и имају релативно кратко трајање на малом простору. Сушом се баве стручњаци из различитих научних дисциплина (метеоролози, хидролози, агрономи, еколози, социолози, економисти) и из разних климатских региона, и сви они имају битно различите критеријуме за

* Грађевинско-архитектонски факултет Универзитета у Нишу, имејл: slavisa@gaf.ni.ac.rs

процену и идентификацију суше. Суша је веома комплексна појава која утиче на водне ресурсе, земљиште, пољопривредну производњу, животну средину, економију, као и на друштво у целини, и не чуди да не постоји јединствена и општеприхваћена дефиниција суше. Уместо тога, постигнута је сагласност да постоје четири типа суше (метеоролошка, пољопривредна, хидролошка и социо-економска суша) који су међусобно повезани.

Значајан недостатак падавина у односу на просечне падавине на одређеном подручју у анализираном временском периоду доводи до појаве метеоролошке суше. Смањење падавина је, врло често, праћено високим температурама, јаким ветром, већом осунчанашћу, што доводи до смањења влажности у земљишту и повећања евапотранспирације (ЕТ) и на крају се манифестује појавом пољопривредне суше. Дефицит влаге у земљишту изазива водни стрес код пољопривредних култура, што доводи до смањења приноса. Хидролошка суша је повезана са ефектима недостатка падавина на водне ресурсе и манифестује се смањењем протицаја река, дотока у језерима и акумулацијама, спуштањем нивоа подземних вода, нивоа воде у акумулацијама. Социо-економска суша настаје када несташица воде почне да утиче на животе људи, на економију, животну средину и на друштво у целини. Ови типови суше се не јављају у истом временском периоду. Генерално, прво се јавља метеоролошка суша, убрзо после ње пољопривредна, и ако се недостатак падавина продужи, долази до појаве хидролошке и социо-економске суше.

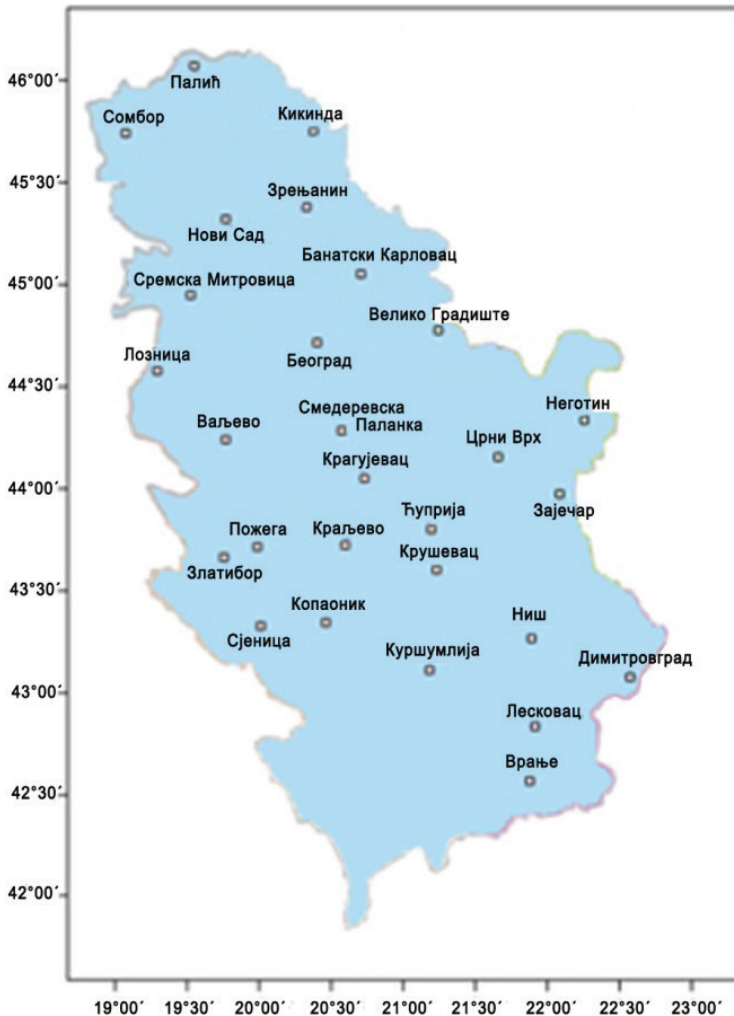
Штете од суше у Србији су велике. У XXI веку, у шест година, процењене штете од суше биле су веће од 500 милиона евра. Највеће су забележене 2012. године када је штета процењена на милијарду и осамсто милиона евра. Износ се најбоље истиче упоређивањем са штетама од катастрофалних поплава из 2014. године (милијарду и седамсто милиона евра) и земљотреса у Краљеву из 2010. године (25 милиона евра, односно 70-ак пута мање од штета од суше из 2012. године). Због великих штета у свим областима друштва, јавила се потреба проучавања самог феномена суше (Trajković et al. 2016). У овом раду биће представљени резултати вишегодишњег истраживања које је спроведено у оквиру пројеката „Развој хидроинформационог система за праћење и рану најаву суше“ (ТР37003) и „Пројектоване промене хидролошких ризика (екстремне количине падавина и суше) у Мађарској и Србији“.

2. МЕТОДЕ И МАТЕРИЈАЛИ

2.1. *Погаџи*

Месечни подаци следећих климатолошких параметара: падавине, максимална и минимална температура ваздуха, релативна влажност ваздуха, осунчаност и брзина ветра за 28 синоптичких станица у Србији за период

1948–2012. (слика 1) преузети су из метеоролошких годишњака Републичког хидрометеоролошког завода Србије. Подаци су изабрани на основу дужине периода мерења, њихове доступности и поузданости. У подацима није било неизмерених вредности. Временске серије коришћене у овом истраживању обезбеђују добру просторну покривеност целе Србије, изузев АП Косово и Метохија за коју новији подаци нису доступни.



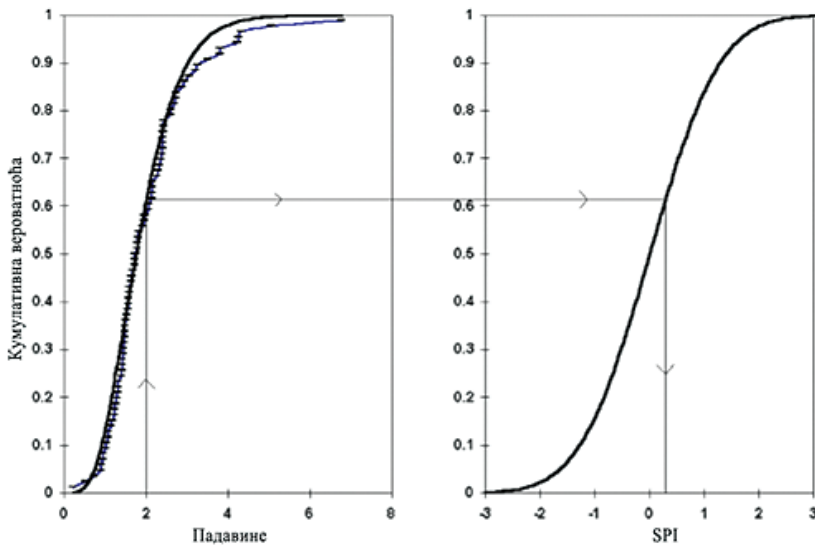
Слика 1. Просторна расподела 28 синоптичких станица

2.2. Индекси суше

Индекси суше представљају алате за детекцију, мониторинг и евалуацију сушних догађаја. До сада је развијено више од 100 индекса суша, а њихов детаљан преглед и класификација могу се наћи у *Mishra and Singh (2010)*. Индекс суша служи за процену ефеката суше и дефинисање различитих параметара суше као што су трајање, интензитет и обим простирања. Пожељно је да индекс суше буде у стању да квантификује сушу за различите временске скале за које су дуге временске серије од суштинског значаја. У овом одељку биће описани стандардизовани индекс падавина (SPI) и индекс варијабилности суфицита воде (WSVI).

2.2.1. Стандардизовани индекс падавина (SPI)

Стандардизовани индекс падавина (*Standardized Precipitation Index, SPI*) развијен је почетком 90-их година прошлог века (McKee et al. 1993). Овај индекс квантификује дефицит падавина за различите временске скале (1, 3, 6, 12, 24, 48 месеци) и може се користити за више типова суше. SPI за краће временске скале (један или три месеца) се користи за метеоролошке суше, за три или шест месеци за пољопривредну сушу, док се SPI за дуге временске скале (12 и 24 месеци) користи за хидролошке суше (Svoboda and Fuchs 2016). SPI је количина падавина забележена током неког временског периода, представљена преко вредности случајне променљиве која има стандардизовану нормалну расподелу вероватноће (слика 2).



Слика 2. Прорачун стандардизованог индекса падавина (SPI)

SPI се добија из израза:

$$SPI = \begin{cases} -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), & 0 < H(x) \leq 0,5 \\ +\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), & 0,5 < H(x) \leq 1,0 \end{cases} \quad (1)$$

где је $X(x)$ кумулативна расподела вероватноће, t се одређује као:

$$t = \begin{cases} \sqrt{\ln \frac{1}{(H(x))^2}}, & 0 < H(x) \leq 0,5 \\ \sqrt{\ln \frac{1}{(1-H(x))^2}}, & 0,5 < H(x) \leq 1,0 \end{cases} \quad (2)$$

а c_0 , c_1 , c_2 , d_1 , d_2 и d_3 су коефицијенти чије су вредности: $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$. Снага овог индекса лежи у чињеници да је могућа међусобна упоредивост података о падавинама из временских периода неједнаке дужине, као и података из сезона и локација са различитим режимима падавина. Највећа слабост је недостатак компоненте евапотранспирације, која је веома важна за водни биланс. Из тог разлога, овај индекс не може се користити у климатским моделима.

Класе суше дефинисане на основу SPI вредности приказане су у табели 1, из које се види да SPI, поред детекције суше, може да служи и за одређивање влажних периода.

Табела 1. Класе суше према SPI

Класе суше	SPI вредности
Екстремно влажно	
Веома влажно	
Умерено влажно	
Скоро нормално	
Умерена суша	
Јака суша	
Екстремна суша	

2.2.2. Индекс варијабилности суфицита воде (WSVI)

Индекс варијабилности суфицита воде (*Water Surplus Variability Index, WSVI*) (Gocic and Trajkovic 2014d) добија се из израза:

$$WSVI_k^{(i)} = \frac{D_k^{(i)} - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

где је $WSVI_k^{(i)}$ = индекс варијабилности суфицита воде за k -ти месец за годину i , $D_k^{(i)}$ = месечни дефицит воде за k -ти месец за годину i , μ = средња вредност и σ = стандардна девијација за посматрани период.

Дефицит воде $D_k^{(i)}$ за годину i и референтни период од k месеци се израчунава као:

$$D_k^{(i)} = \sum_{j=1}^k (P_{ij} - ET_{ij}) \quad (4)$$

где су P_{ij} = падавине и ET_{ij} = референтна евапотранспирација за месец j за годину i . За разлику од осталих индекса, евапотранспирација се рачуна према стандардној ФАО-56 Пенман-Монтеј (Penman-Monteith) методи (Allen et al. 1998). Укључивање ET га чини идеалним за климатске моделе. Ове године успостављена је сарадња на том плану са два веома угледна светска универзитета (ЕЛТЕ Универзитет из Будимпеште и Католички универзитет из Левена). Може се користити за све типове суше и има исте класе суше као и SPI. Овај индекс суше има одлично слагање у хумидним климатским условима са свим водећим светским индексима суше (SPI, SPEI, RDI).

2.3. Евајотранспирација

Постоји велики број емпиријских метода за прорачун евапотранспирације (ET) које су развијене и тестиране за различите географске и климатске услове. Евапотранспирација се не може увек описати једноставним, линеарним зависностима и зато боље резултате у различитим климатским условима, по правилу, имају комплексније методе (Trajkovic and Kolakovic 2009a). У овом раду биће представљене методе које се користе у појединим индексима суше.

2.3.1. Торнтвајт (Thornthwaite) метода

Торнтвајтова метода (Thornthwaite 1948) рачуна ET из израза:

$$ET_0 = \frac{16N}{360} \left(\frac{10T}{\sum_{i=1}^{12} (0.2T_i)^{1.514}} \right)^{0.016 \sum_{i=1}^{12} (0.2T_i)^{1.514} + 0.5} \quad (5)$$

где је: ET_0 = референтна евапотранспирација (мм дан⁻¹), N = максимално трајање сунчевог сјаја (сат дан⁻¹), T = средња дневна температура ваздуха (°C). Торнтвајтова метода се примењује широм света и као улазни параметар тражи познавање само средње дневне температуре ваздуха која се добија као просечна вредност максималне и минималне температуре ваздуха.

2.3.2. Харгривс (*Hargreaves*) метода

Харгривс метода (Hargreaves et al. 1985) захтева само температуру ваздуха као улазни параметар и веома је погодна за једноставан и брз прорачун евапотранспирације. Регионална калибрација Харгривс методе урађена је изменом Харгривс експонента (Trajkovic 2007). На основу података из Ниша, Палића и Сарајева добијена је нова, измењена вредност Харгривс експонента од 0.424. На тај начин, добијена је модификована Харгривс једначина (Trajkovic 2007):

$$ET_{0,АН} = 0.023 \cdot 0.408 \cdot R_a \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.424} \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} + 17.8 \right) \quad (6)$$

где је: R_a = екстратерестријална радијација (MJ м⁻² дан⁻¹), T_{max} = максимална дневна температура ваздуха (°C), T_{min} = минимална дневна температура ваздуха (°C). Начин прорачуна екстратерестријалне радијације је детаљно објашњен у Allen et al. (1998).

2.3.3. Пенман-Монтеј (*Penman-Monteith*) метода

Пенман-Монтеј метода је стандардна метода прорачуна референтне евапотранспирације (Allen et al. 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 \cdot (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 \cdot U_2)} \quad (7)$$

где је: ET_0 = референтна евапотранспирација (мм дан⁻¹); Δ = пад напона zasiћене водене паре (кПа °C⁻¹); R_n = нето радијација (MJ м⁻² дан⁻¹); G = земљишни флуks топлоте (MJ м⁻² дан⁻¹); γ = психрометријска константа (кПа °C⁻¹); T = средња температура ваздуха на 2 м висине (°C); U_2 = брзина ветра на 2 м висине (м с⁻¹); $(e_a - e_d)$ = дефицит напона водене паре на 2 м висине (кПа).

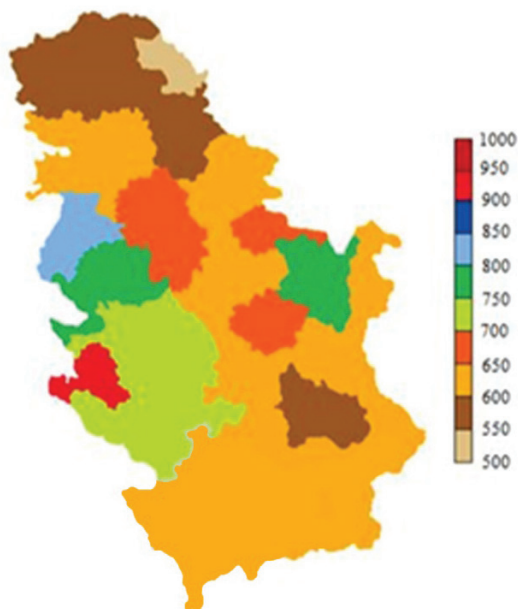
Бројни улазни подаци су потребни за прорачун евапотранспирације овом методом и то: максимална и минимална температура ваздуха; максимална и минимална релативна влажност ваздуха (или стварни напон водене паре), брзина ветра на 2 м висине, стварно трајање сунчевог сјаја (или соларна

радијација). Ако нема података о сунчевом сјају и релативној влажности, предлаже се њихов прорачун из израза у којима фигуришу максимална и минимална температура ваздуха (Allen et al. 1998). Ако нема података о брзини ветра предлаже се усвајање просечне глобалне, регионалне или локалне вредности за брзину ветра (Allen et al. 1998, Trajkovic and Kolakovic 2009b).

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

3.1. Просторно-временска расподела падавина

За одређивање просторне расподеле падавина коришћени су подаци о месечним сумама падавина за период 1948–2012. године са 28 синоптичких станица Републичког хидрометеоролошког завода Србије. На слици 3. приказана је просторна расподела просечних годишњих падавина у Србији. Највећи део Србије има годишње падавине између 600 и 650 мм. Најмање падавина (500–600 мм) има на северу Војводине. Области на западу и југозападу су највлажнији региони Србије. Висина падавина се креће од 700 до 850 мм, на планинама и близу 1000 мм (Gocic and Trajkovic 2014c). Просечне падавине по годишњим добима износе: 167 мм у пролеће, 196 мм у лето, 158 мм у јесен и 141 мм зими.



Слика 3. Просторна расподела падавина у Србији

Најуједначеније су падавине зими, када на највећем броју станица падне од 120 до 160 мм. Лети падне највише кише на Златибору (271 мм), док најмање падавина зими има Палић (112 мм).



Слика 4. Временска серија падавина у Србији

На слици 4. представљене су просечне годишње падавине у Србији за период 1948–2012, линеарни тренд и просечна вредност падавина која износи 666 мм. Са слике се јасно види да нема значајнијег тренда. Линеије тренда и просечне вредности падавина се скоро поклапају. Од 1990. године су уочене екстремније вредности падавина. Највише падавина је било 1955, 1999. и 2010, а најмање падавина 1990, 2000. и 2011. Деценија 1970–1980. је била просечно воднија од 1980–1990. Од 2000. године имамо учесталије годишње смене са израженијим разликама: „водна–сушна“.

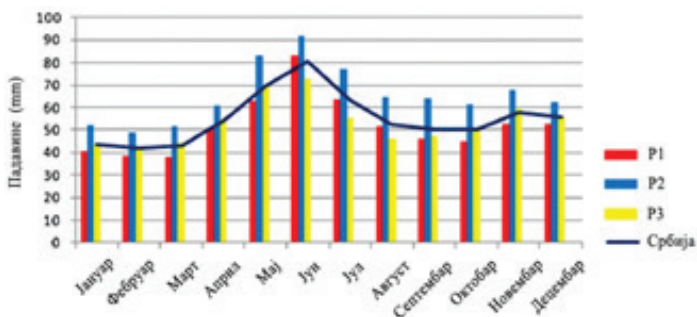
3.2. Регионализација Србије

У *Gocic and Trajkovic (2014b)* представљена су три региона одређена на основу спроведене анализе главних компоненти (*Principal Component Analysis, PCA*) и методе кластера (*Cluster Analysis, CA*) над добијеним главним компонентама (слика 5). Регион Р1 обухвата север Србије од Палића до Смедеревске Паланке и то је регион са најмањом количином падавина у земљи. Запад Србије од Дрине до Крагујевца и Копаоника спада у регион Р2, који је са највећом количином падавина. Остатак земље спада у регион Р3, који карактеришу умерене падавине чији је просек око 630 мм.



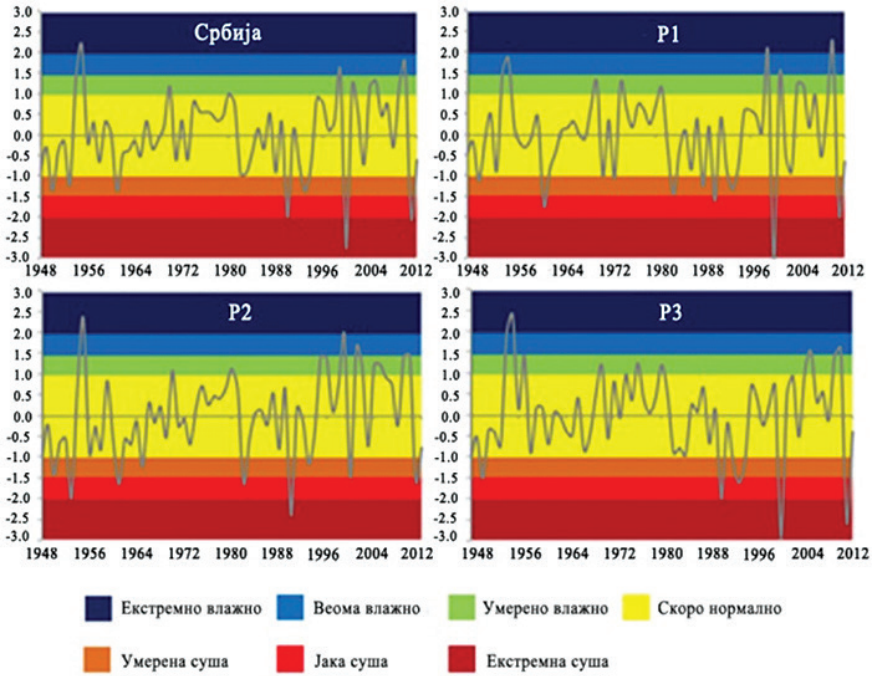
Слика 5. Регионализација Србије према угрожености од суша

На слици 6. представљене су просечне месечне падавине по регионима. У свим регионима највише кише падне током јуна (12%) и маја (10%), а најмање током фебруара (6%). У свим месецима највише падавина има у региону P2 (запад). Од септембра до маја, најмање падавина је у региону P1 (север), а у периоду јун–август најмања висина падавина је забележена у региону P3 (југ) (Gocic and Trajkovic 2014c).

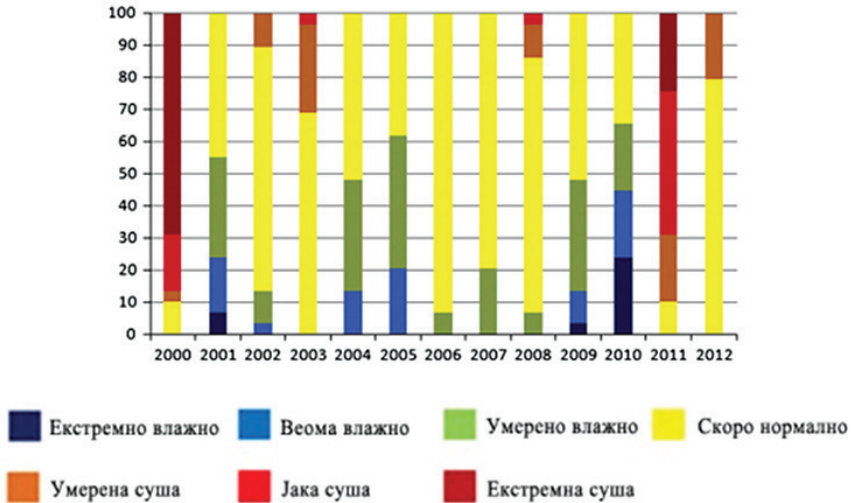


Слика 6. Просечне месечне падавине у регионима Србије

Временске серије SPI-12 акумулативно за сваку годину, за Србију и по регионима, приказане су на слици 7. Најсушнија је била 2000. година, док је 1955. била најкишнија током посматраног периода. Од 1990. године уочена је повећана учесталост појаве суше. Три најсушније године биле су 1990, 2000. и 2011, с тим да је суша у тим годинама била блажа у P2 региону. Појава суша у регионима P1 и P3 је слична. Приметна је нешто већа учесталост екстремних суша у P3 региону (Gocic and Trajkovic 2014b).



Слика 7. Временске серије SPI-12 за Србију и три региона



Слика 8. SPI-12 у периоду од 2000. до 2012.

Анализа просторне заступљености суше у Србији у периоду 2000–2012. приказана је на слици 8, са које се види да је 2000. скоро 70% територије

Србије било погођено екстремном сушом, око 20% јаком сушом, а само 10% је имало нормалне климатске услове. Нешто другачија заступљеност је за 2011. годину – око 25% је погођено екстремном сушом, 45% јаком, а 20% умереном сушом (Gocic and Trajkovic 2014b).

Учесталост суше је представљена на слици 9. Приближно 69% анализираних година према SPI-12 припада нормалној класи суше, док 16% спада у године са вишком падавина. Нешто мањи проценат нормалних година био је у P2 региону (65%), у којем је забележен већи проценат влажних година у односу на остатак Србије. У 15% година забележене су суше, и то: у 8% година умерене, у 5% јаке и у 2% екстремне суше (Gocic and Trajkovic 2014b). По регионима, највише екстремних суша (око 4%) је било у јужном P3 региону, а највише умерених суша, око 10%, у северном P1 региону.

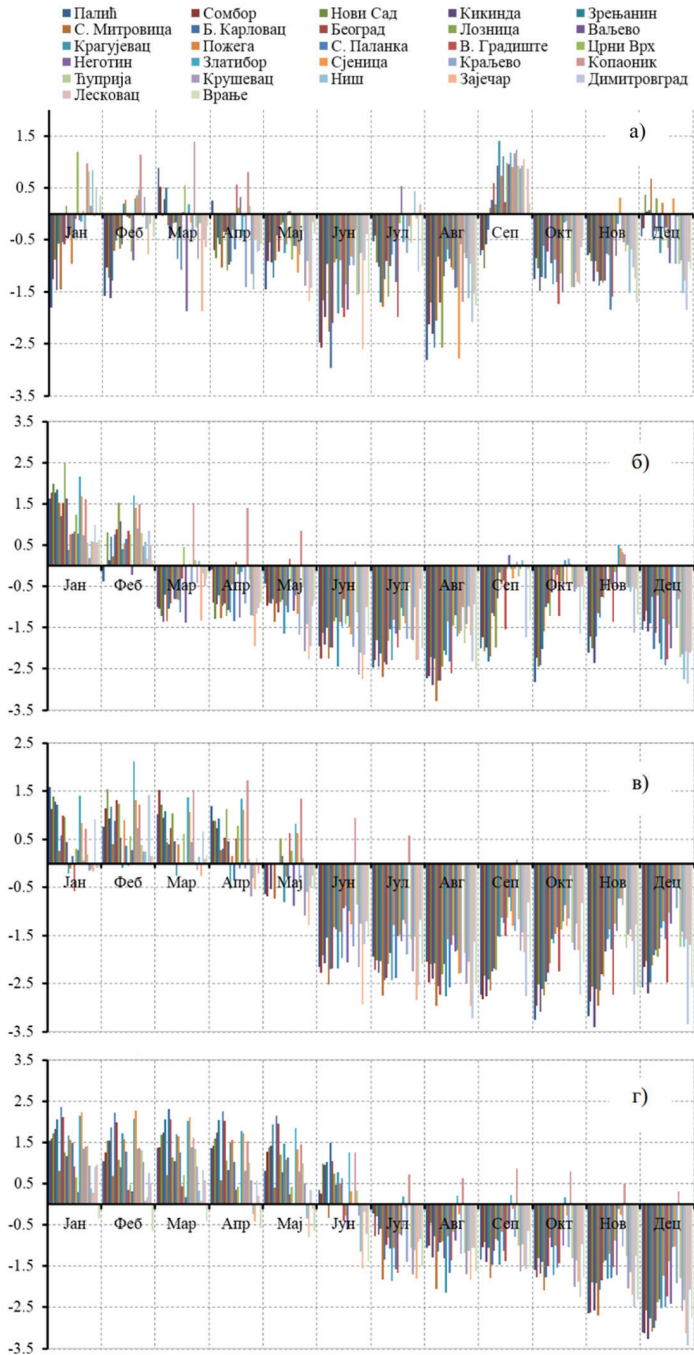


Слика 9. Категорије суше према SPI-12 у периоду 1948–2012.

Анализа SPI-12 за десет станица у Србији (од Палића до Врања) у периоду 1949–2011, показала је да је у Нишу суша седам пута трајала дуже од 12 месеци, а да је најдужа суша, у трајању од 29 месеци, забележена у Врању (Tosic and Unkasevic 2014). Генерално, закључак је био да суше трају дуже од севера према југу Србије и да на југу имају већи интензитет, што се слаже са резултатима представљеним у овом раду.

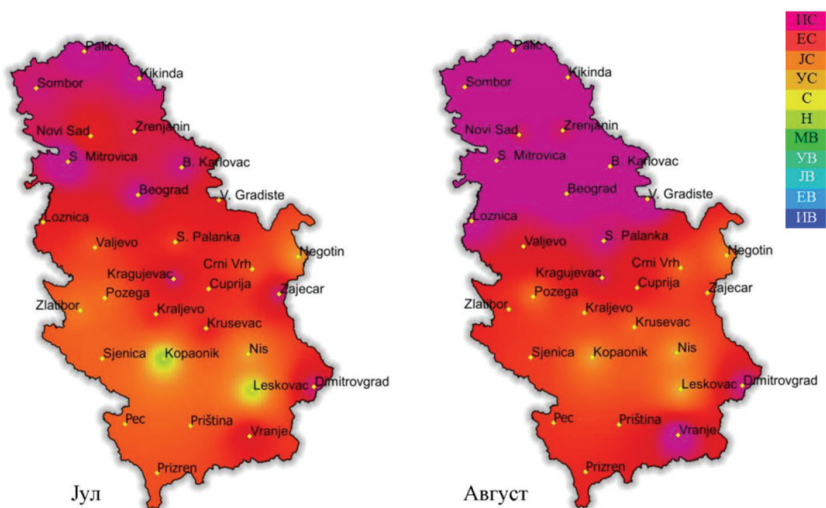
3.3. Просторна расподела суше у 2000. години

Вредности SPI за различите временске скале (SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-12) за најсушнију 2000. годину, за 27 станица, приказане су у виду хистограма на слици 10. (Gocic and Trajkovic 2019). Вредности SPI-1 су најниже у јуну и августу и на већини станица су негативне, са изузетком септембра. Што се тиче SPI-3, негативне вредности почињу од марта, а најниже вредности су од јуна до августа. На основу вредности SPI-6, може се закључити да у Србији није било суше до јуна месеца, од када почиње јака суша на већини станица. Слични резултати се добијају и са SPI-12, с тим да је јака суша забележена на већини станица у новембру и децембру.

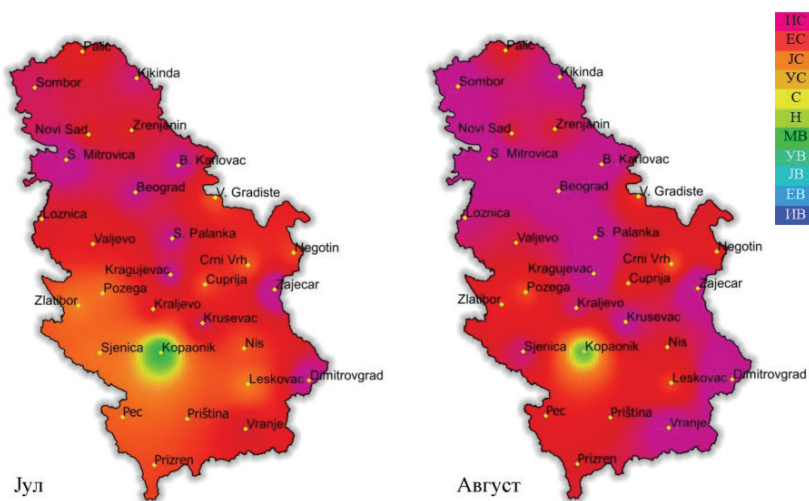


Слика 10. Хистограм SPI интензитета у Србији за 2000. годину а) SPI-1, б) SPI-3, в) SPI-6 и г) SPI-12

Просторни распоред суше на основу интензитета SPI-3 и SPI-6 за јули и август 2000. године представљен је на слици 11. и слици 12, респективно. Према SPI-3, суша се јавља од марта и достиже највећи интензитет у августу, али је изражена и у децембру (Gocić and Trajković 2019). Суша је углавном најинтензивнија на северу и југоистоку Србије (слика 11). Према SPI-6, суша се протеже у периоду јун–децембар и најинтензивнија је током августа (Gocić and Trajković 2019), када је забележена екстремна или изузетна суша на целој територији Србије осим Копачице (слика 12).



Слика 11. Просторни приказ SPI-3 за јул и август 2000. године



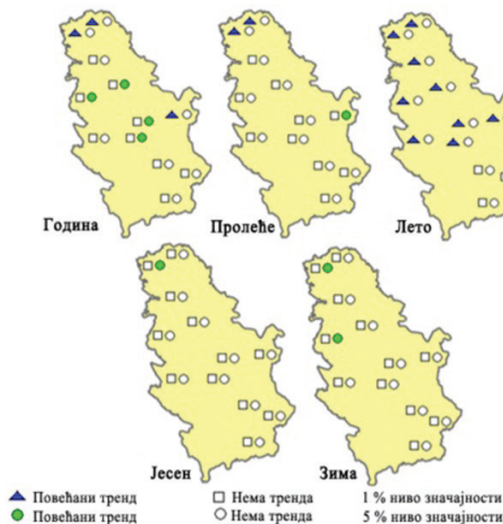
Слика 12. Просторни приказ SPI-6 за јул и август 2000. године

3.4. Анализа тренда падавина и референтне евапотранспирације

Сезонски и годишњи трендови падавина добијени су Мен-Кенделовим и Сеновим тестовима за дванаест станица у периоду 1980–2010. (Gocić and Trajković 2013). Значајни растући годишњи тренд падавина забележен је само у Сомбору, за ниво значајности од 5%. Значајни сезонски растући трендови забележени су само у Неготину (пролеће) и Новом Саду (јесен), за ниво значајности од 5%.

Трендови референтне евапотранспирације добијени су Мен-Кенделовим и Спирмен ро тестом за дванаест анализираних станица у периоду 1980–2010. (Gocić and Trajković 2014a). Пенман-Монтеј метода је коришћена за прорачун евапотранспирације. Значајни сезонски растући трендови забележени су у пролеће у Неготину (5% значајности), Палићу и Сомбору (1% значајности), лети је забележен значајан тренд повећања на нивоу значајности од 1%, свуда осим у Димитровграду, Нишу и Врању, где није било значајнијих трендова. У јесен је постојао значајан тренд повећања у Сомбору (5% значајности) а зими у Лозници и Сомбору (5% значајности). На годишњем нивоу значајан тренд повећања забележен је у Београду, Краљеву, Крагујевцу и Лозници (5% значајности), као и у Неготину, Палићу и Сомбору (1% значајности).

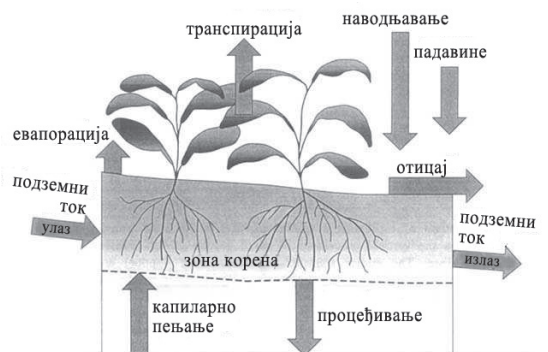
На слици 13. представљена је просторна расподела станица са трендовима за 1% и 5% нивоа значајности одређених Мен-Кенделовим тестом. На северу и у централном делу Србије видљив је значајан позитиван сезонски и годишњи тренд, док три станице на југу Србије (Ниш, Врање, Димитровград) нису имале значајан тренд.



Слика 13. Просторна расподела тренда

3.5. Утицај прорачуна ЕТ на поузданост индекса суше

Евапотранспирација је, поред падавина, најзначајнији елемент водног биланса. Састоји се од међусобно зависних сложених процеса кретања воде из земљишта и кроз биљке у атмосферу (Trajkovic et al. 2003). Повећана евапотранспирација уз недостатак падавина доводи до дефицита влаге у земљишту (слика 14) и ствара услове за настанак пољопривредне суше и, посредно, до хидролошке и социо-економске суше.



Слика 14. Водни биланс земљишта

Зато не чуди да се у бројним индексима суше (PDSI, RDI, SPEI, WSVI) поред падавина користи и евапотранспирација. Торнтвајтова метода, која за прорачун ЕТ користи само температуру ваздуха, се најчешће користи (PDSI, RDI, SPEI) због своје једноставности. Проблем је што та метода није нарочито поуздана и даје одступања од стандардних Пенман-Монтеј ЕТо вредности, која за Србију износе око 15% (Trajkovic et al. 2019).

Харгривс метода се, такође, често користи за прорачун ЕТ. Међутим, ова метода прецењује вредности ЕТ на хумидним локацијама (Trajkovic and Kolakovic 2009c) и у климатским условима Србије има вредности које су за 21% веће од стандардних Пенман-Монтеј ЕТо вредности (Trajkovic 2005). Из тих разлога је и развијена модификована Харгривс метода, чијим се коришћењем добија евапотранспирација која се мало разликује од стандардних Пенман-Монтеј вредности. У просеку, за локације у Србији те разлике износе мање од 0,3% (Trajkovic 2007), а за локације у Француској око 3% (Trajkovic 2004). Одличне резултате ова метода је показала у семиаридним (Farzanpour et al. 2019) и хумидним (Tabari et al. 2013) климатским условима Ирана.

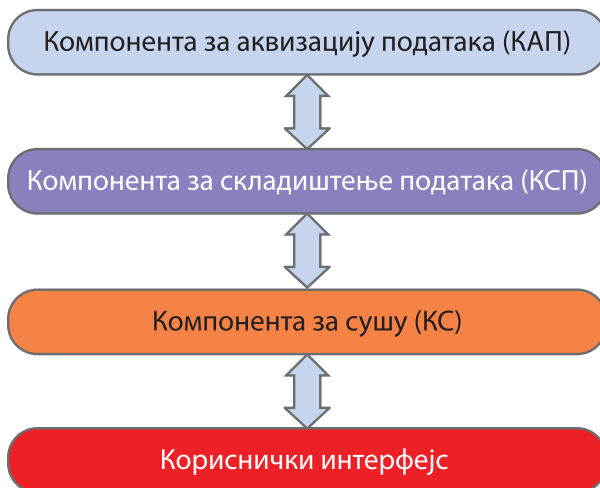
Велики број улазних параметара (температура ваздуха, релативна влажност ваздуха, соларна радијација, брзина ветра), који често нису доступни, је разлог зашто се стандардна Пенман-Монтеј метода више не користи у индексима суше. Развијене су процедуре за прорачун недостајућих параметара коришћењем података о температури ваздуха и тако добијена метода се назива температурном Пенман-Монтеј методом.

Коришћењем серија података са станица из Грчке анализиран је утицај избора метода прорачуна ЕТ на поузданост индекса суше (Vangelis et al. 2013). Евапотранспирација за RDI-6 (октобар–март и април–септембар) и RDI-3 (октобар–децембар, јануар–март, април–јун и јули–септембар) добијена је коришћењем Тортитвајт, Харгривс, Блени-Кридл и температурне Пенман-Монтеј методе. У свим анализираним периодима и за све станице, значајно боље резултате су остварили Харгривс и температурна Пенман-Монтеј метода (Vangelis et al. 2013).

3.6. Мере за ублажавање последица суше

Основна мера за ублажавање последица суше је адаптација технологије гајења усева и засада. У оквиру ове мере посебну пажњу треба поклонити увођењу и коришћењу врста и сорти/хибрида толерантнијих на стресне услове, променама и усавршавању система обраде у циљу боље конзервације влаге, повећању заступљености гајења озимих усева и прилагођавању плодореда.

Веома важна мера је мониторинг, анализа и рана најава суше. Одељење за агрометеорологију РХМЗ у свом делокругу има анализу, праћење и оцену услова за појаву суше и користи већи број индекса суше: стандардизовани индекс падавина (SPI) за периоде од 1 до 24 месеца, PDSI, Палмеров Z индекс, климатски индекс влажности (CMI) и индекс влажности земљишта (SMI). Како је PDSI избачен из оперативне употребе у најразвијенијим земљама света већ више од двадесет година, потребно је укључити нове индексе суше који у обзир узимају и утицај евапотранспирације на сушу. На пример, SPEI и WSVI се користе у хидро-информационом систему за праћење суше који је развијен у оквиру научног пројекта TP37003. Овај систем је заснован на сервисно-оријентисаној архитектури и веб-сервисима. Архитектура система је представљена на слици 15.



Слика 15. Архитектура хидро-информационог система

4. ЗАКЉУЧАК

Суша је веома комплексна појава која утиче на водне ресурсе, земљиште, пољопривредну производњу, животну средину, економију, као и на друштво у целини. Од свих елементарних непогода, суша у Србији изазива највеће материјалне штете. Велики значај има детекција, мониторинг и евалуација сушних догађаја и за ту сврху користе се индекси суше. Употреба стандардизованог индекса суше (SPI) је показала да на основу спроведене анализе главних компоненти и методе кластера у Србији, према угрожености од суше, постоје три региона (P1 – северни, P2 – западни и P3 – јужни). У анализираном периоду 1948–2012. суша се појављивала у 15% година. Већа учесталост суше забележена је од 1990. године. Регион P3 је највише угрожен од суше током летњих месеци. У остатку године, најугроженији је регион P1. Тренд повећања евапотранспирације на већини анализираних локација, показује да се у будућности може очекивати већа учесталост суше. Из тог разлога избор индекса суше који ће се користити у мониторингу суше добија на значају. У раду се предлаже укључивање нових индекса суше (SPEI или WSVI) који у обзир узимају и утицај евапотранспирације на сушу. Такође, предлаже се коришћење модификоване Харгривс и температурне Пенман-Монтеј методе за прорачун евапотранспирације у индексима суше (SPEI, WSVI, RDI).

ЗАХВАЛНОСТ

У овом раду је представљен део истраживања која се спроводе у оквиру националног пројекта „Развој хидроинформационог система за праћење и рану најаву суша“ (TR37003) и билатералног пројекта „Пројектоване промене хидролошких ризика (екстремне количине падавина и суше) у Мађарској и Србији“ (451-03-02294/2015-09/10).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Roma.
- [2] Gocic, M., Trajkovic, S., 2013. *Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia*. Global and Planetary Change 100, 172–182.
- [3] Gocic, M., Trajkovic, S., 2014a. *Analysis of trends in reference evapotranspiration data in a humid climate*. Hydrological Sciences Journal 59 (1), 165–180.

- [4] Gocic, M., Trajkovic, S., 2014b. *Spatiotemporal characteristics of drought in Serbia*. Journal of Hydrology 510, 110–123.
- [5] Gocic, M., Trajkovic, S., 2014c. *Spatio-temporal patterns of precipitation in Serbia*. Theoretical and Applied Climatology 117 (3–4), 419–431.
- [6] Gocic, M., Trajkovic, S., 2014d. *Drought characterisation based on Water Surplus Variability Index*. Water Resources Management 28 (10), 3179–3191.
- [7] Gocic, M., Trajkovic, S., 2019. *QGIS as a supporting tool for spatial distribution of drought*. Annual of the University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Sofia, Bulgaria (in press).
- [8] Hargreaves, L. G., Hargreaves, G. H., Riley, J. P., 1985. *Irrigation Water Requirements for Senegal River Basin*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 111 (3), 265–275.
- [9] Farzanpour, H., Shiri, J., Sadraddini, A. A., Trajkovic, S., 2019. *Global comparison of 20 reference evapotranspiration equations in a semi-arid region of Iran*. Hydrology Research 50(1), 282–300.
- [10] McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., 1993. *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. In: 8th Conference on Applied Climatology, 17–22 January, Anaheim, California, 179–184.
- [11] Mishra, A. K., Singh, V.P., 2010. *A review of drought concepts*. Journal of Hydrology 354 (1–2), 202–216.
- [12] Svoboda, M., Fuchs, B., 2016. *Handbook of Drought Indicators and Indices*. Drought Mitigation Center Faculty Publications, University of Nebraska, Lincoln, USA.
- [13] Tabari, H., Grismer, E. M., Trajkovic, S., 2013. *Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions*. Irrigation Science, 31(2), 107–117.
- [14] Thornthwaite, C. W., 1948. *An approach toward a rational classification of climate*. Geography Review, 38 (1), 55–94.
- [15] Tomic, I., Unkasevic, M., 2014. *Analysis of wet and dry periods in Serbia*. International Journal of Climatology 35 (4), 1357–1368.
- [16] Trajkovic, S., 2004. *Estimating reference evapotranspiration at French humid locations by modified Hargreaves method*. International Conference BALWOIS 2004, Ohrid, Macedonia.
- [17] Trajkovic, S., 2005. *Temperature-Based Approaches for Estimating Reference Evapotranspiration*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 131 (4), 316–323.
- [18] Trajkovic, S., 2007. *Hargreaves versus Penman-Monteith under Humid Conditions*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 133 (1), 38–42.
- [19] Trajkovic, S., Gocic, M., Pongracz, R., Bartoly, J., 2019. *Adjustment of Thornthwaite equation for estimating evapotranspiration in Vojvodina*, Theoretical and Applied Climatology, <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02873-1>
- [20] Trajkovic, S., Kisi, O., Markus, M., Tabari, H., Gocic, M., Shamshirband, S., 2016. *Hydrological Hazards in a Changing Environment: Early Warning, Forecasting, and Impact Assessment*. Advances in Meteorology, doi: 10.1155/2016/2752091
- [21] Trajkovic, S., Kolakovic, S., 2009a. *Wind-adjusted Turc equation for estimating reference evapotranspiration*. Hydrology Research, 40(1), 45–52.

- [22] Trajkovic, S., Kolakovic, S., 2009b. *Estimating Reference Evapotranspiration Using Limited Weather Data*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 135(4), 443–449.
- [23] Trajkovic, S., Kolakovic, S., 2009c. *Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations under Humid Conditions*. Water Resources Management 23 (14), 3057–3067.
- [24] Trajkovic, S., Todorovic, B., Stankovic, M., 2003. *Forecasting of Reference Evapotranspiration by Artificial Neural Networks*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 129(6), 454–457.
- [25] Vangelis, H., Tigkas, D., Tsakiris, G., 2013. *The effect of PET method on Reconnaissance Drough Index (RDI) calculation*. Journal of Arid Enviroment, 88 (1), 130–140.
- [26] Yue, S., Pilon, P., Cavadias, G., 2002. *Power of the Mann–Kendall and Spearman's Rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series*. Journal of Hydrology 259, 254–271.

Slaviša Trajković

SPATIOTEMPORAL CHARACTERISTICS OF DROUGHTS IN SERBIA

S u m m a r y

Drought is a very complex phenomenon affecting water resources, soil, agricultural production, environment, economy and society as a whole. This paper bases its estimates of spatio-temporal characteristics of drought on the data on monthly precipitation from 28 stations in Serbia in the period 1948–2012. The analysis of main components and analysis of the cluster showed that there were the following regions in Serbia, regarding the drought hazard: R1 – North of Serbia, R2 – West for Serbia and R3 – South of Serbia. The R2 region has the above average values of precipitation, while the R1 and R3 regions have precipitation below average values for Serbia. The occurrence of drought is analyzed based on the SPI-12 drought class. 69% of analyzed years belongs to the normal class, while 16% belongs to the years with surplus of precipitation. Drought occurs in 15% of years, 8% being moderate drought, 5% severe drought and 2% extreme drought. An increase in the frequency of occurring droughts has been recorded since 1990. An increasing trend of evapotranspiration indicates that in the future, a higher frequency of drought can be expected. The paper proposes the inclusion of new indices into the drought monitoring (SPEI, WSVI). Also, it proposes the use of the modified Hargreaves and temperature Penman-Monteith method for calculating evapotranspiration in drought indices (SPEI, WSVI, RDI).