

Porovnanie metód pre operatívny monitoring meteorologického sucha

Livia Labudová^{1,2}, Terézia Janáčková^{1,2}

¹ Katedra fyzickej geografie a geoekológie, Prírodovedecká fakulta UK v Bratislave, Mlynská dolina, 84215 Bratislava, livia.leskova@uniba.sk

² Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava, livia.labudova@shmu.sk

Abstract

The aim of the paper is not only to assess meteorological drought, but to compare different methodologies for its assessment as well. This comparison should lead to the recommendation of certain methodologies for the operational drought monitoring. Three worldwide established indices (SPI, SPEI and CDD) were used for the analysis of meteorological drought. We chose also one regional methodology defined in Slovakia by Šamaj and Valovič in 1972. It was necessary to slightly modify the methodology of the SPI and the SPEI calculation to get daily data of the indices (SPImv and SPEImv) and to enable their usage in the operational monitoring. We kept the original accumulation period of 30 days, although we did not deal with monthly data, but we applied moving window on the daily data. Such modified method enabled us to describe drought periods through parameters such as duration, intensity and deficit volume. The results show that the SPImv and SPEImv values correspond each other very well. The differences between the periods according to these indices are mainly observed as the shift of period begin, or period termination, less in the intensity. This could be caused mainly due to the location of model area, which is situated in the northern part of Slovakia, where the role of the potential evapotranspiration is not as high as in the southern regions. The change in their seasonal occurrence was recorded as there were observed more drought periods in warm half-year in the last decades then in the other. In the context of climate change, which is accompanied with a temperature increase and thus water demands increase as well, it is necessary also to consider the potential evapotranspiration in the drought assessment. It is obvious from the differences noted between the results from different methodologies. The national methodology from Slovakia shows the largest deficiency as it assess periods with only almost no precipitation. But such cases are very rare and water deficit accumulation is more dangerous for agricultural productivity. This method did not identify even very intensive drought periods in the last two decades.

Anotation

The aim of the paper was to describe changes in drought periods and to compare different methodologies to give a recommendation for the operational drought monitoring. The modified daily SPEI seems to be the most suitable for the meteorological drought monitoring, which should be used for agricultural purposes.

Key words: SPI; SPEI; povodie Kysuce; CDD; obdobie sucha

Anotácia

Cieľom príspevku bolo popísať zmeny v obdobiach sucha a porovnať rozdielne metodiky, aby bolo možné poskytnúť odporúčanie pre operatívny monitoring sucha. Upravený, denný SPEI

index sa javí ako najvhodnejší pre monitoring meteorologického sucha, ktorý by mal byť využívaný na poľnohospodárske účely.

Kľúčové slová: SPI; SPEI, the Kysuca river basin; CDD; drought period

Úvod

V posledných desaťročiach bolo publikovaných viacero indexov na hodnotenie sucha v rámci viacerých vedných disciplín, ktoré by malo byť možné identifikovať na úrovni rôznych časových krokov. Najčastejšie sa využívajú ročné a mesačné analýzy. Aj keď je rok dlhá doba, môže sprostredkovať informácie o regionálnom správaní sa sucha. Na druhej strane, mesačné analýzy sú vhodnejšie pre potreby poľnohospodárstva a vodného manažmentu (Mishra a Singh, 2010). Čoraz častejšie sa kladie dôraz aj na operatívny monitoring, pre ktorý je nevyhnutná denná báza. Z tohto dôvodu sme sa v predkladanej práci zamerali práve na dennú časovú úroveň.

Veľká pozornosť problematike sucha sa venuje v Maďarsku (Szalai et al., 2000; Makra et al., 2002; Mika et al., 2005; Blanka et al., 2013; Pongrácz et al., 2014). Szalai et al. (2000) použitím 3-mesačného SPI zaznamenali vysušovanie najmä na konci jari, začiatku leta a na konci jesene. Blanka et al. (2013) analyzovali projektované zmeny v hrozbe sucha pre územie Maďarska. Vyčlenili štyri regióny z hľadiska tendencií v rámci klimatickej zmeny, ktoré boli hodnotené pre teplotné a zrážkové charakteristiky. Územie hraničiace s Podunajskou nížinou predpokladá len mierny nárast teploty vzduchu, ale jednoznačné zmeny v jej extrémoch. Predpokladá sa tu mierny nárast úhrnu zrážok, ale súčasne sú očakávané aj zmeny v extrémnych zrážkových udalostiach. Územie susediace s Juhoslovenskou a Košickou kotlinou, ako aj Východoslovenskou nížinou má najnižšiu priemernú teplotu vzduchu a jej najvyššiu vnútroregionálnu variabilitu. Rovnako sa tu však predpokladá mierny nárast teploty vzduchu a počtu extrémnych teplotných udalostí. Rovnaký vývoj je očakávaný aj na základe výsledkov Pongrácz et al. (2014). Autori sa v štúdiu zamerali na hodnotenie zmien v 10- a 20-ročnej návratnosti zrážkových úhrnov v Maďarsku, ale aj na zmeny v priemernej a maximálnej dĺžke suchého obdobia (počet za sebou nasledujúcich dní s úhrnom < 1mm). Predpokladajú, že udalosť, opakujúca sa v lete raz za 10 rokov (ref. obdobie 1961 – 1990), sa do konca storočia bude vyskytovať raz za 14 až 18 rokov.

Pre územie Českej republiky boli urobené štúdie zamerané aj na vplyv suchých období na poľnohospodárske plodiny (Potop et al., 2012a; Potop et al., 2012b; Potop a Türkott, 2012; Potopová et al., 2015). Potop et al. (2012b) použili indexy SPI a SPEI pre zhodnotenie vývoja suchých období v nížinných oblastiach Českej republiky v období 1901 – 2010 a pre zhodnotenie vplyvu suchých období na produkciu poľnohospodárskych plodín v povodí rieky Labe. Pre územie Českej republiky bola zistená vysoká korelácia medzi indexom SPEI a štandardizovanými rezíduami výnosov poľnohospodárskych plodín (SYRS) v období 1961 - 2010 (Potopová et al, 2015). Navyše sa objavila aj výsušná tendencia jarných mesiacov, predovšetkým marca. Na tzv. „otváranie nožníc“ poukazujú autori Záhradníček et al. (2016), nakoľko narastá extrémnosť prejavov počasia a striedajú sa povodne s epizódami sucha. Rovnako narastá počet bezzrážkových dní, ale aj výskyt veľmi intenzívnych zrážok. To je sprevádzané rastom počtu tropických nocí a dní, pričom ich výrazný nárast je predikovaný aj regionálnymi klimatickými modelmi.

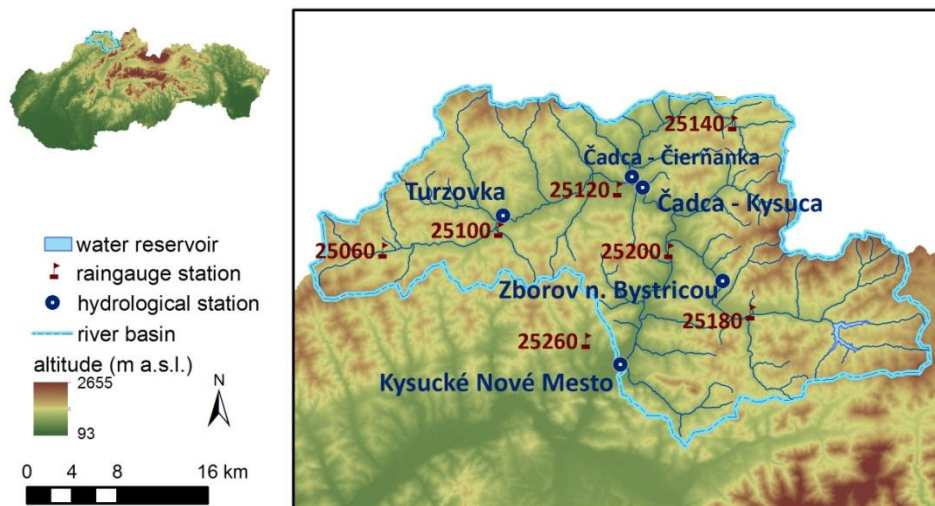
Niekoľko štúdií zameraných na problematiku meteorologického sucha vzniklo aj na Slovensku. Suchými obdobiami sa na Slovensku v minulosti zaoberali Šamaj a Valovič (1972), ktorí pre ich analýzu vytvorili vlastnú metodiku (pre detailnejší popis vid' kapitola Metodika). V neskoršom období medzi štúdie zaoberajúce sa meteorologickým suchom patrili napríklad výsledky publikované kolektívom Patassiová et al. (2002). Analyzované boli nielen zrážkové úhrny v mesiacoch apríl a máj, ale aj PDSI index. Analýzy identifikovali, že početnosť suchých jarných mesiacov v posledných dvoch až troch desaťročiach minulého storočia dosiahla maximum pre celé sledované obdobie 1961 – 2000. V apríli je pritom pravdepodobnosť výskytu 20-dňového bezzrážkového oddielu až 14 % a v máji len 4,2 %, zatiaľ čo pravdepodobnosť výskytu 15 bezzrážkových dní v apríli dosahuje hodnotu 29 % a v máji 11,6 %. Najnovšou štúdiou zameranou na poľnohospodárske sucho na Slovensku je publikácia Takáča (2015), ktorý okrem iných indikátorov využíva index SPI.

Okrem štúdií hodnotiacich historické obdobia, ktoré sú často sprevádzané predikciami modelov, existuje v oblasti výskumu sucha snaha o vybudovanie efektívneho monitoringu sucha a systému včasného varovania. V zahraničí vzniklo už viacero platforiem, ktoré takéto informácie poskytujú. Medzi najstaršie patrí U.S. Drought Monitor (<http://droughtmonitor.unl.edu>). Vytvorený bol aj Atlas rizika sucha (Drought Risk Atlas; Svoboda et al., 2015), ktorý týždenne poskytuje hodnoty viacerých indexov, napr. SPI, SPEI, PDSI, scPDSI, decilov zrážok a iných. Monitoring sucha vznikol aj v juhovýchodnej Európe, kde pôsobí Drought Management Centre for Southeastern Europe (http://www.dmcsee.org/en/drought_monitor/).

Od apríla 2014 beží monitoring sucha aj v Českej republike pod názvom Intersucho. Zameriava sa na hodnotenie pôdnej vlhkosti a kondície vegetácie. V roku 2015 sa k projektu pridal aj Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ), a tak od jesene 2015 beží tento monitoring nielen pre Česko, ale aj Slovensko (www.intersucho.sk). Okrem toho, SHMÚ úspešne vyvinul aj vlastný monitoring sucha, ktorý je zameraný na meteorologické sucho. Rovnako, raz týždenne vyhodnocuje indexy SPI a SPEI na dennej báze a index CMI na týždennej báze, pričom dostupná je aj predpoveď indexov na nasledujúcich sedem dní na základe výstupov z modelu ECMWF.

Metodika

Pre výpočet zvolených indexov sucha v povodí Kysuce, ktorá je naším modelovým územím, boli potrebné denné údaje úhrnov zrážok, maximálna a minimálna denná teplota vzduchu, priemerná denná teplota vzduchu, priemerná denná relatívna vlhkosť vzduchu, priemerná denná rýchlosť vetra, ako aj trvanie slnečného svitu. Namerané meteorologické údaje, distribuované Slovenským hydrometeorologickým ústavom (SHMÚ), boli analyzované pre obdobie 1981 – 2010. Vybraných bolo sedem zrážkomerných staníc pre povodie Kysuce (Obr. 1). Pre lepšie zachytenie distribúcie zrážok v povodí sme pracovali aj so stanicami, ktoré síce ležia mimo povodia, ale sú reprezentatívne pre jeho časť. V povodí Kysuce ide o stanicu Nesluša, ktorá reprezentuje južnú časť povodia.



Obr. 1 Rozloženie zrážkomerných a hydrologických staníc v povodí Kysuce

Keďže pre výpočet štandardizovaného zrážkového a evapotranspiračného indexu (SPEI) je potrebný výpočet potenciálnej evapotranspirácie (PET), počet staníc, ktoré ponúkajú potrebné údaje, je výrazne nižší, než je počet zrážkomerných staníc. Pre povodie Kysuce boli dostupné len klimatologické stanice Čadca a Žilina (reprezentujúca len najjužnejšie časti povodia).

Štandardizovaný zrážkový index (SPI)

Štandardizovaný zrážkový index (Standardized precipitation index - SPI) bol vyvinutý a publikovaný kolektívom McKee et al. (1993). Údaje zrážkových úhrnov v jedno alebo viacemesačnom kroku sú najprv aproximované Gamma rozdelením. Stredná hodnota tohto teoretického rozdelenia, ako aj štandardná odchýlka, je využívaná následne pri normalizácii a štandardizácii údajov, ktorých výsledná stredná hodnota je rovná 0. Negatívne hodnoty indexu znamenajú suché podmienky, pozitívne naopak, vlhké podmienky, pričom ich intenzita je odstupňovaná v jednotlivých kategorizačných stupňoch (Tab. 1). V predkladanom článku boli suché obdobia vyhraničené podľa Spinoni et al. (2013). Suché obdobie tak začína, keď hodnota SPI je ≤ -1 a končí prvou, za ňou nasledujúcou, kladnou hodnotou indexu.

Štandardizovaný zrážkovo-evapotranspiračný index (SPEI)

Štandardizovaný zrážkový a evapotranspiračný index (Standardized precipitation and evapotranspiration index - SPEI) bol vyvinutý autormi Vicente-Serrano et al. (2010) úpravou SPI. Autori upozornili na nedostatok SPI, ktorý nedokáže reflektovať zmenu výskytu suchých období v kontexte klimatickej zmeny a s ňou spojeným rastom priemernej teploty vzduchu na mnohých miestach sveta. Tento rast teploty sa prejavuje aj na raste evapotranspirácie, ktorá zvyšuje požiadavky na množstvo vody v krajine. Preto nimi upravený index nepracuje len so zrážkovými úhrnmi, ale s jednoduchou vodnou bilanciou určenou ako rozdiel medzi zrážkami a potenciálnou evapotranspiráciou v danom časovom období. Na rozdiel od SPI indexu sa na aproximáciu dát najčastejšie používa log-logistické rozdelenie. SPEI kombinuje senzitivitu Palmerovho indexu závažnosti sucha (PDSI) na zmeny vo výpare, spojené s teplotnými fluktuáciami a trendmi, s jednoduchými a viac škálovými výpočtami SPI (Potop et al., 2012b).

Nakoľko údaje o potenciálnej evapotranspirácii nie sú dostupné, bolo potrebné ich vypočítať z dostupných údajov. Pre tento zámer bola vybraná Penman-Montheitova metóda. Táto metóda

je všeobecne odporúčaná Organizáciou pre výživu a poľnohospodárstvo (FAO) a Svetovou meteorologickou organizáciou (WMO).

Na to, aby bolo možné porovnať výsledky SPI, aj SPEI indexu s inými dennými indexmi meteorologického sucha, bolo nevyhnutné zosúladiť časový krok, v akom boli dáta spracovávané. Týkalo sa to konkrétne indexov SPI a SPEI, ktoré vo svojej originálnej definícii sú počítané z mesačných údajov, zatiaľ čo metóda hraničnej hodnoty na identifikáciu hydrologického sucha je založená na denných údajoch. Z tohto dôvodu došlo k úprave metodiky výpočtu týchto indexov. Mesačné údaje o úhrnoch zrážok predstavujú množstvo zrážok spadnutých počas 30-dňového akumuláčného obdobia. Ak teda ostane zachované akumuláčné obdobie, metodika výpočtu samotného indexu je aplikovateľná s rovnakou štatistickou správnosťou. Tento princíp bol zatiaľ predstavený len pre trojmesačný index SPI v rámci projektu DROughtadaPtation (DROP) vo Flámsku (Maetens et al., 2014). V predkladanom článku sme pozmenenú metodiku aplikovali nielen na index SPI, ale aj SPEI. Na denné úhrny zrážok sme aplikovali metódu 30-dňovej pohyblivej sumy, ktorá priradila každému dňu n hodnotu úhrnu zrážok za $n-29$ až n dní. Rovnako sme postupovali pri potenciálnej evapotranspirácii. Výsledkom tak boli denné hodnoty, ktoré reprezentovali stav zrážok, resp. jednoduchej vodnej bilancie počas posledných 30 dní. Pre identifikáciu suchých období boli použité rovnaké kritériá ako pri mesačných indexoch. Sucho tak začínalo v deň, keď hodnota indexu klesla pod hodnotu -1 a bolo ukončené v deň s prvou kladnou hodnotou indexu. Tak sme získali presné termíny začiatku a konca suchých období, čo nám umožnilo vypočítať aj charakteristiky ako trvanie, objem deficitu a intenzitu sucha. Táto metodika bola úspešne otestovaná aj v rámci prvej sezóny monitoringu sucha, ktorý začal realizovať Slovenský hydrometeorologický ústav (Labudová a Turňa, 2015a). Táto úprava metodiky nám umožnila priame porovnanie výskytu a parametrov suchých období medzi meteorologickým a hydrologickým suchom.

Počet za sebou nasledujúcich suchých dní (CDD)

Počet za sebou nasledujúcich suchých dní (Consecutive Dry Days – CDD) je index, ktorý určuje počet najviac za sebou nasledujúcich dní, ktorých denný úhrn zrážok neprekračuje stanovenú limitnú hodnotu (Kutiel, 1985). Expertný tím pre detekciu a indexy klimatickej zmeny (Expert Team on Climate Change Detection and Indices – ETCCDI), pracujúci pod WMO, ho pridal na zoznam 27 indexov pre monitoring a identifikáciu klimatickej zmeny (Klein Tank et al., 2009), pričom ako odporúčanú hraničnú hodnotu určili 1 mm. Napriek tomu, že CDD je zaužívaný ako najvyšší ročný počet za sebou nasledujúcich dní, v predkladanej práci sme sledovali aj celkový počet CDD období za rok a ich sezónny výskyt. Minimálna dĺžka trvania pritom musí dosahovať aspoň 10 dní.

Pri hodnotení výskytu suchých období v jednotlivých mesiacoch sme pripisovali výskyt tomu mesiacu, ktorý spadal k strednému dátumu obdobia. Pre rozdelenie období do troch kategórií podľa dĺžky ich trvania (krátko-, stredno- a dlhodobé) sme využili 50 – ty a 90 – ty percentil dĺžky všetkých období na všetkých sledovaných stanicích. Takto sme získali informáciu o časovej variabilite trvania suchých období. Pre odlišenie najdlhšie trvajúcich období sme využili 95 – ty percentil z rovnakého súboru, pričom prednostne nás zaujímali obdobia s výskytom v mesiacoch marec až september. Tieto mesiace sú totiž najzaujímavejšie pre aplikáciu výsledkov, napr. v poľnohospodárskej praxi.

Metodika podľa Šamaja a Valoviča (1972)

Metodika publikovaná Šamajom a Valovičom (1972) definuje prísnejšie podmienky pre identifikáciu suchých období v porovnaní s CDD, nakoľko pracuje s kumulatívnymi zrážkami za celé identifikované obdobie namiesto denných úhrnov, ktoré sú použité pri predchádzajúcom indexe. Autori definovali tri kritériá, pomocou ktorých je na denných dátach určený presný začiatok a koniec sucha. Kritériá sú nasledovné:

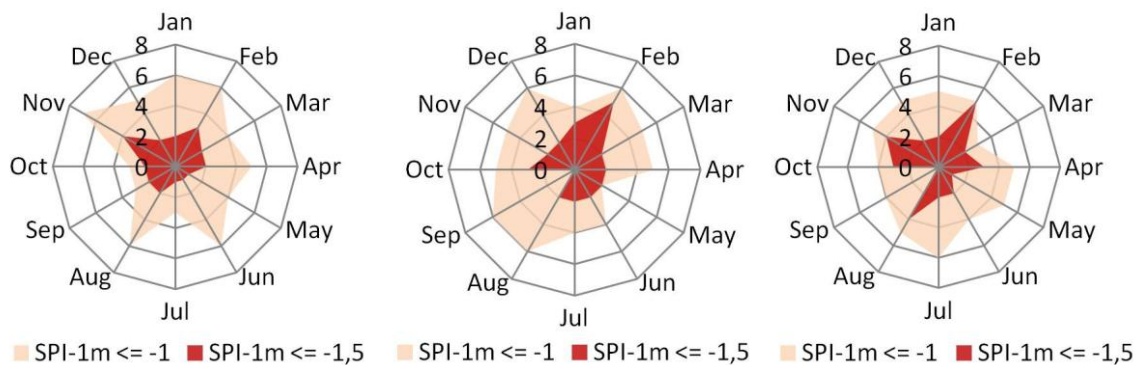
1. 15 a viac za sebou nasledujúcich dní s kumulatívnym úhrnom zrážok pod 1 mm,
2. 20 a viac za sebou nasledujúcich dní s kumulatívnymi úhrnmi zrážok pod 2,5 mm,
3. 30 a viac za sebou nasledujúcich dní s kumulatívnymi úhrnmi zrážok pod 5 mm.

Pri hodnotení výskytu suchých období v jednotlivých mesiacoch, ako aj rozdelení období do kategórií rôznych trvaní sme využili rovnakú metodiku ako pri CDD indexe.

Výsledky

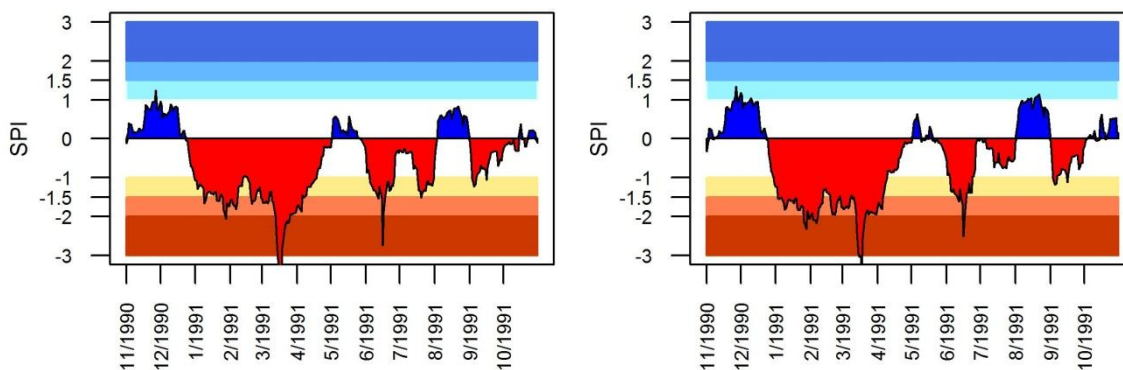
Pri porovnaní počtu suchých období podľa 1-mesačného SPI v jednotlivých dekádach nebola pozorovaná žiadna tendencia, nakoľko pri porovnaní prvej a poslednej dekády sú rozdiely len minimálne. K ich miernemu nárastu došlo len v oblasti Turzovky a Čadce. Takmer na všetkých staniách bolo najmenej suchých období zaznamenaných v rokoch 1991 – 2000, s výnimkou Skalitého. Klesajúcu tendenciu však možno pozorovať pri dĺžke trvania epizód. Kým na všetkých staniách bola v rokoch 1981 - 1990 priemerná dĺžka epizódy 2 až 2,5 mesiaca, v poslednom desaťročí to bolo už len 1,3 až 1,7 mesiaca. Tieto výsledky veľmi dobre korešpondujú s výsledkami SPI_{mv}, ktorý bol použitý na dennej báze s rovnakým akumulácnym časom ako 1-mesačný SPI, avšak nie pre konkrétne stanice, ale čiastkové povodia. SPI_{mv} taktiež zaznamenal najmenší počet suchých období v druhej dekáde sledovaného obdobia a klesajúcu tendenciu dĺžky epizód. Jedinou odchýlkou v porovnaní s SPI-1 je najdlhšia priemerná dĺžka suchého obdobia v povodí Čierňanky a horného toku Kysuce, ktorá dosiahla maximum (viac ako 40 dní) práve v rokoch 1991 – 2000.

Z hľadiska suchom zasiahnutých mesiacov podľa 1-mesačného SPI je ich rozloženie počas roka pomerne rovnomerné na väčšine klimatologických staníc v povodí. Väčšie rozdiely boli zaznamenané len v oblasti Starej Bystrice, kde dominujú mesiace december a jún, pričom minimálne bývajú zasiahnuté mesiace marec a september. Pri staniách na severozápade územia je najzriedkavejší suchý september alebo október, zatiaľ čo na juhu je to marec a na severovýchode máj. Naopak, najčastejšie sú zasahované v severnej časti povodia mesiace február a november, kde 20 % až 27 % jednotlivých mesiacov bolo klasifikovaných ako suchých. V južnej časti povodia je síce toto percento nižšie, len 16,7 %, avšak dosahuje ho oveľa väčší počet mesiacov v roku (Obr. 2). Ak sa pozrieme len na veľmi až extrémne suché mesiace, vidíme, že najmä na juhu územia a v okolí Skalitého jednoznačne dominuje ich výskyt vo februári, kde dokonca celkový počet zasiahnutých mesiacov február sa rovná počtu veľmi až extrémne suchých mesiacov február (Obr. 2). V Krásne nad Kysucou mu sekundujú august a november. Na severozápade územia je počet takýchto udalostí nižší, pričom dominuje taktiež február a v Čadci aj mesiac máj.



Obr. 2 Počet jednotlivých mesiacov zasiahnutých suchom podľa mesačného SPI na staniách Turzovka (vľavo), Skalité (v strede) a Krásno nad Kysucou (vpravo) v období 1981 – 2010

SPI_{1m} nám v dennom kroku umožnil aj porovnanie období z hľadiska intenzity sucha a objemu deficitu. Aj keď je v niektorých čiastkových povodiach pozorovaný vyšší počet epizód s $mi > 100\%$ dlhodobého priemeru, vyššie hodnoty intenzít boli dosahované počas prvých desiatich hodnotených rokov. Klesá aj počet období s nadpriemerným objemom deficitu, ako aj jeho hodnoty dosahované počas epizód. Najvýznamnejšou udalosťou bolo sucho počas prvých štyroch mesiacov v roku 1991 (Obr. 3). Objem deficitu dosahoval až 4,5 násobok priemerného deficitu, pričom aj intenzita sucha bola nadpriemerná. Absolútne minimum počas epizódy bolo jedno z najnižších zaznamenaných vôbec, aj keď prvenstvo patrí jarnému suchu v roku 1981 (hodnoty nižšie ako -4, v čiastkovom povodí Bystrice dokonca pod -5). Dĺžkou trvania bolo v povodí Kysuce významné aj suché obdobie počas leta 1996. Trvanie prevyšovalo 100 dní, avšak absolútne minimum nebolo ani zďaleka také extrémne, ako v iných prípadoch kratších epizód, čo sa odzrkadlilo aj na pomerne nízkej intenzite.



Obr. 3 SPI_{1m} v hydrologickom roku 1991 v čiastkovom povodí po stanicu Turzovka (vľavo) a Kysucké Nové Mesto (vpravo)

Aj keď pri SPI_{1m} nie je možné presne určiť podiely zasiahnutých mesiacov, keďže suché obdobia začínajú a končia v ich priebehu, je možné urobiť aspoň pomer ich zastúpenia v teplom a chladnom polroku. Zatiaľ čo v prvej dekáde bol počet suchých období v jednotlivých polrokoch vyrovnaný, v rokoch 2001 – 2010 výrazne prevažujú obdobia v teplom polroku (Tab. 1). Ešte výraznejší je ich pomer v druhej dekáde.

Tab. 1 Počet suchých období v teplom (TP) a chladnom polroku (CHP) v jednotlivých dekádach podľa SPImv v čiastkových povodiach Kysuce v období 1981 - 2010

obdobie		Kysucké N. M.	Zborov n. B.	Čadca - Čierňanka	Čadca - Kysuca	Turzovka
1. dekáda	TP	15	14	12	15	18
	CHP	16	16	14	15	16
2. dekáda	TP	14	15	15	16	16
	CHP	8	9	7	8	9
3. dekáda	TP	20	15	19	20	20
	CHP	14	13	13	13	14

Na rozdiel od SPImv, pri SPEImv bol zachytený mierny nárast počtu suchých období v poslednej dekáde. V Čadci bol pritom ich počet v druhej dekáde výrazne nižší, len 23, než v ostatných desaťročiach, keď sa ich vyskytlo 30, resp. 35. Na druhej strane ich priemerná dĺžka trvania bola výrazne dlhšia (41,3 dňa v porovnaní s 35 dňami). V najjužnejších, najnižšie položených častiach povodia, kde klimatické podmienky môžu byť bližšie Žiline, bol síce pozorovaný nárast počtu epizód, ale zároveň aj skrátenie ich priemernej dĺžky trvania v poslednej dekáde. Na celom území taktiež narastá počet suchých období s výskytom v teplom polroku na úkor tých, ktoré sú zaznamenávané v chladnom polroku. Jednoznačne to súvisí s nárastom priemerných mesačných teplôt vzduchu, ktoré boli zaznamenané najmä v mesiacoch teplej sezóny. Tie podmieňujú vyššie hodnoty potenciálnej evapotranspirácie, čo sa následne odráža na jednoduchej vodnej bilancii.

Tab. 2 Počet suchých období s určitou intenzitou a objemom deficitu, ako aj ich priemerná dĺžka trvania v jednotlivých dekádach podľa SPImv na stanici Čadca v období 1981 - 2010

	1.dekáda	2.dekáda	3.dekáda
intenzita >100%	12	13	21
intenzita <100%	18	10	14
objem deficitu >100%	11	11	11
objem deficitu <100%	19	12	24
celkovo	30	23	35
trvanie	35.9	41.3	35.0

Z hľadiska intenzity suchých období sú výsledky takmer totožné s výsledkami SPImv. Aj keď dochádza k nárastu období s nadpriemernou intenzitou (Tab. 2), ich hodnoty pre jednotlivé obdobia sú nižšie. Rovnako klesá aj počet období s nadpriemerným objemom deficitu.

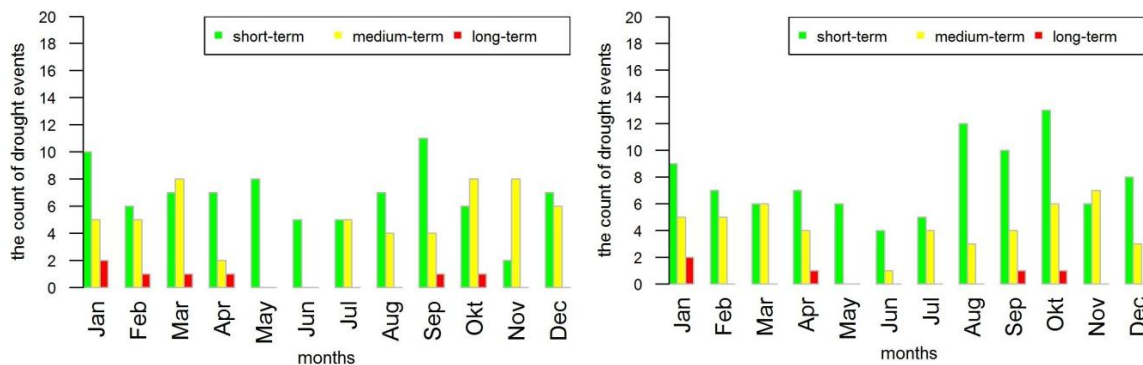
Hodnotiac zasiahnuté mesiace, je pri mesačnom indexe SPEI situácia v porovnaní s SPI-1m odlišná, aj keď k dispozícii sú len stanice Čadca a Žilina. V okolí Čadce je najčastejšie suchým mesiacom máj s podielom 30 %, pričom výrazne mu sekundujú mesiace september a október s podielom 23 %. Spomínané mesiace vedú aj v kategórii veľmi až extrémne suchých prípadov. V Žiline sa o prvenstvo delí apríl a november, pričom SPEI-1m sa pod hodnotou -1 často pohybuje aj vo februári, máji a júni.

Výsledky získané aplikáciou CDD indexu sa z hľadiska vývoja počtu a obdobia výskytu suchých epizód výrazne zhodujú s výsledkami SPI. Celkový počet suchých epizód mierne klesol počas sledovaného obdobia, predovšetkým v okolí Nesluše. Počet období počas teplého polroka sa však výraznejšie nemení a na väčšine staníc je ich výskyt dlhodobo ustálený. To znamená, že vypadávajú skôr zimné suché obdobia. Najviac epizód na celom území povodia

sa vyskytlo v rokoch 1986, 1991, 1992 a 1996, pričom v rámci teplého polroka dominoval rok 1992. Rok 2003 sa v počte udalostí prejavil len v okolí Nesluše. Nižší počet udalostí však neznamená nevyhnutne normálne až vlhké podmienky, v tom ktorom roku. Môže totiž znamenať ich dlhšie trvanie. Napríklad, v roku 1981 sa vyskytlo jediné suché obdobie počas apríla, avšak s 31-dňovým trvaním a o jeho intenzite svedčí aj index SPI_{mv}. Takéto dlhé obdobie sa v Makove vyskytlo aj vo februári až menci 1991, pričom v januári mu predchádzala ďalšia 17-dňová epizóda. Za dva a pol mesiaca tu spadlo len 42,5 mm zrážok, pričom dlhodobý priemerný úhrn zrážok v Makove v tomto období je 187 mm. Znamenalo to výrazne nižšiu akumuláciu snehovej pokrývky, a tým aj nižšie zásoby vody pre jarné topenie snehu. Mierne zrážkovo deficitným bol následne aj apríl. Veľmi podobná situácia nastala v Turzovke v roku 1982. Tri za sebou v pomerne krátkom čase nasledujúce obdobia s trvaním od 16 do 20 dní spôsobili, že počas prvých troch mesiacov spadlo len 53,9 mm, kým dlhodobo v priemere by to malo byť 182,8 mm. Všetky situácie sa veľmi podobne prejavovali na všetkých zvolených stanicích. Podobný vývoj bol zaznamenaný aj v menci až apríli 2007 mimo okolia Starej Bystrice. V dolnej časti toku Kysuce išlo dokonca o jedno súvislé obdobie.

Po vyselektovaní najdlhšej epizódy podľa CDD v každom teplom polroku, pritom sa tým nemyslia len epizódy s trvaním nad 90 – ty percentil, je zjavné, že sa vyskytujú najmä v menci a apríli, ale pomerne častý býva aj august alebo september. Takmer absentujú zrážkovo štandardne bohaté mesiace máj až júl. Jednoznačne najdlhšia epizóda za celé obdobie v povodí trvala v Skalitom od 10. februára do 29. marca 1984 (49 dní). Vo zvyšných častiach povodia pritom trvala podstatne kratšie, od 17 do 22 dní. Maximálne dĺžky trvania, nad 23 dní, v teplom polroku sú veľmi zriedkavé a vyskytli sa prevažne v prvej polovici sledovaného obdobia. Ak vezmeme do úvahy maximálnu dĺžku trvania v rámci celého roka, tak väčšina z nich sa vyskytuje práve v teplom polroku, a len niečo málo viac ako tretina v polroku chladnom, s výnimkou Starej Bystrice.

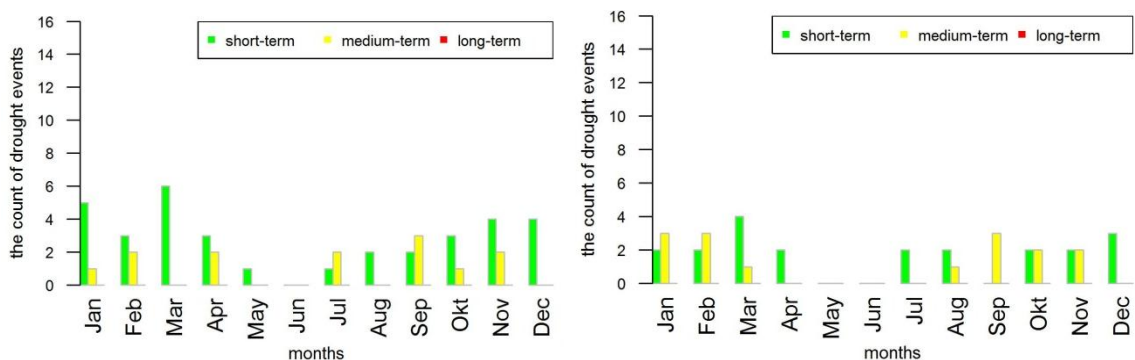
Suché epizódy boli rozdelené do troch kategórií podľa dĺžky trvania. Vo väčšine mesiacov jednoznačne prevládajú krátke obdobia (do 13 dní). Výnimkou je len november, keď sa v okrajových častiach povodia dvojnásobne a viac často vyskytujú stredne dlhé obdobia (13 až 21 dní; Obr. 4). Táto kategória pritom takmer úplne absentuje v júni a v niektorých prípadoch aj máji alebo júli. Naopak, jej častejší výskyt je zaznamenaný v mesiacoch september až marec.



Obr. 4 Výskyt jednotlivých kategórií trvania suchých epizód počas roka na stanici Stará Bystrica (vľavo) a Krásno nad Kysucou (vpravo) v období 1981 – 2010

S narastajúcim časovým kritériom výrazne klesá počet období, ktoré sa podľa neho vyskytnú. Zároveň sa väčšina epizód, nezávisle od použitého kritéria, vyskytuje v chladnom polroku. Je to ovplyvnené charakterom ročného chodu zrážok, ako aj inverzným počasím a dlhším zotrvávaním anticyklonálneho charakteru počasia v zime nad naším územím, než v teplom polroku. V okolí Čadce, pri 15-dňovom kritériu je možné pozorovať zmenu vo frekvencii výskytu. Kým v prvej dekáde sa vyskytli dve epizódy každý druhý rok, v druhej a tretej dekáde to už bolo jedno obdobie takmer každý rok. Výnimkou bol rok 2007, keď boli zaznamenané až tri obdobia, z toho dve v teplom polroku. Rovnaká situácia bola v danom roku aj v ostatných častiach povodia. Zaujímavá je pomerne vysoká variabilita počtu epizód v jednotlivých rokoch v rámci povodia. Častejšie bolo zachytené aj sucho podľa 30-dňového kritéria po roku 2000. Naopak, takéto epizódy úplne absentujú v okolí Krásna nad Kysucou a Starej Bystrice. Pri 20-dňovom kritériu nie je možné určiť žiaden trend vývoja suchých období, nakoľko ich výskyt počas skúmaného časového intervalu bolo rovnomerné a nevykazuje žiadnu tendenciu.

Z hľadiska dĺžky období úplne absentujú dlhé epizódy v rámci jednotlivých kritérií. Pri treťom kritériu sa vyskytujú takmer výlučne krátke obdobia s dĺžkou do 37 dní, pričom sa len zriedka objavujú v teplom polroku, takmer výlučne v jarných mesiacoch marec a apríl. Navyše, len zriedka býva zasiahnuté celé povodie. Len v rokoch 1981 a 2007 sa na jar vyskytli výrazné epizódy, ktoré boli identifikované vo vysokej zhode aj so zvyšnými použitými indexmi. Dlhé trvanie, 48 dní, malo aj sucho na jar 1984, ktoré ale zasiahlo len východnú polovicu povodia, pričom na zvyšnom území došlo len tesne k splneniu aspoň druhého kritéria. So skracovaním časovej podmienky v rámci kritérií rastie aj ich počet a je pomerne pekne viditeľný ročný chod ich výskytu s minimom v júni a maximom v januári, resp. marci (Obr. 5).



Obr. 5 Výskyt jednotlivých kategórií trvania suchých epizód počas roka podľa 1. kritéria metodiky Šamaja a Valoviča na stanici Nesluša (vľavo) a Stará Bystrica (vpravo) v období 1981 – 2010

CDD má pomerne dobrú zhodu výskytu sucha s SPI_{mv}, avšak jedna epizóda SPI_{mv} je rozkúskovaná často na viacero CDD epizód. Tie sú navyše ukončené skôr, než pri SPI_{mv}, vzhľadom na 30-dňovú akumuláciu tohto indexu. Navyše, najkratšie CDD epizódy medzi zrážkovo bohatšími dňami síce indikujú suchu, ale SPI_{mv} ho neodráža, podobne ako prietoky. Z tohto hľadiska je na operatívne hodnotenie vhodnejší SPI_{mv}, aj keď je potrebné zohľadňovať jeho priebeh minimálne jeden až dva mesiace pred začiatkom sucha (snehová akumulácia v zime, „Medardova kvapka“ v lete a pod.).

Metóda Šamaj-Valovič sa vôbec nedá použiť pre operatívne zachytenie meteorologického sucha. Táto metóda napríklad ani nenaznačila možný výskyt suchých období, ktoré boli nakoniec veľmi intenzívne a s vysokými objemami deficitu. SV metodika preto nemá šancu zachytiť takéto epizódy, pretože identifikuje iba takmer úplne bezzrážkové obdobia.

Záver

Z hľadiska počtu a dĺžky suchých období podľa SPI a SPEI pozorujeme protichodný vývoj. Kým 1-mesačné indexy majú ustálený, resp. mierne rastúci počet období a klesajúcu dĺžku trvania, tak na 3-mesačnej úrovni sa ich trvanie predlžuje. To svedčí o pomerne vysokej variabilite predovšetkým zrážkových podmienok, ktoré sa výrazne menia z mesiaca na mesiac, čo podmieňuje skracovanie období SPI-1m a SPEI-1m. V konečnom dôsledku však môže ísť len o krátke a menej významné prerušenia, často podmienené búrkovou činnosťou počas leta, ktoré však majú menší význam, pokiaľ sa hodnotia spomínané indexy s 3-mesačným časovým krokom.

SPI_{mv} a SPEI_{mv} dosahujú veľmi vysokú zhodu pri identifikácii suchých období. Zväčša sa líšia o niekoľko dní na začiatku alebo konci epizódy. Aktuálne informácie o práve spomínaných indexoch, aj so sedemdnňovou vyhlídkou vývoja, sú už v tejto chvíli dostupné v rámci Monitoringu sucha na SHMÚ.

Podľa nášho názoru, v kontexte klimatickej zmeny, ktorá prináša na mnohých miestach zvyšovanie priemernej teploty vzduchu, a tým aj vyššie nároky na vodu vplyvom zvyšujúceho sa výparu, nepostačuje len sledovanie zrážkových úhrnov, ale potrebné je brať do úvahy aj potenciálnu evapotranspiráciu, hoci aj v zjednodušenej podobe. Svedčia o tom aj výsledky indexov hodnotiace meteorologické sucho, napr. index CDD a metodika Šamaja a Valoviča verzus SPEI a SPEI_{mv}. Prvé dve metodiky nedokážu v dostatočnej miere zachytiť závažnosť situácie a mnoho suchých období nezachytia, hoci v skutočnosti požiadavky na vodu výrazne prekračujú jej prísun. V tom lepšom prípade je jedna epizóda podľa SPI_{mv}, alebo SPEI_{mv} rozdelená na viaceré oddelené epizódy podľa CDD, avšak nemáme informáciu o ich intenzite. Metodika podľa Šamaja a Valoviča vykazuje ešte väčšie nedostatky, keďže jej kritériá sú postavené na sledovaní takmer bezzrážkových období. Sucho však len zriedka znamená obdobie kompletne bez zrážok. Oveľa väčšie nebezpečenstvo predstavuje kumulujúci sa vlhový deficit, ktorý v konečnom dôsledku výrazne negatívnejšie môže ovplyvniť napríklad poľnohospodársku výrobu, ale aj vodný manažment. Navyše, pri výskyte suchých období podľa metodiky Šamaja a Valoviča, najmä ich prvého kritéria, je zreteľný ročný chod počtu epizód. Početnejšie, a aj dlhšie trvajúce sú epizódy v chladnom polroku a maximom prevažne v januári a minimom v júni. Odráža sa tu tak viacročný chod zrážok, než reálny výskyt sucha. Vzhľadom na závery, ktoré sme už spomínali v súvislosti s významom potenciálnej evapotranspirácie, sa táto metodika javí ako nedostatočná pre monitorovanie sucha, najmä z pohľadu jeho aplikácie v poľnohospodárstve.

Menej snehu vyvoláva jeho rýchlejšie roztopenie, často aj v skoršom termíne, čo umožňuje skorší, rýchlejší začiatok ohrevu pôdy. To vytvára veľmi dobré podmienky pre vyšší výpar, čím klesá vlhkosť pôdy predovšetkým v horných častiach pôdneho profilu. Preto sa domnievame, že pre poľnohospodárov prináša lepšie informácie SPEI index, aj keď je, samozrejme, potrebné sledovať aj indikátory pôdnej vlhkosti signalizujúce jej nedostatok.

Použitá literatúra

- BLANKA, V., MEZÖSI, G., MEYER, B. 2013. Projected changes in the drought hazard in Hungary due to climate change. In: *Időjárás*, Vol. 117, Is. 2, p. 219-237.
- KLEIN TANK, A., ZWIERS, F., ZHANG, X. 2009. Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. WMO, pp. 55.
- KUTIEL H. 1985. The multimodality of the rainfall course in Israel, as reflected by the distribution of dry spells. In: *Archives for Meteorology, Geophysics and Bioclimatology, Series B*. Vol. 36. Is. 1, p. 15-27.
- LABUDOVÁ, L., TURŇA, M. 2015. Monitoring sucha. Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava. Dostupné online na: <http://www.shmu.sk/sk/?page=2161>. Citované 15.1.2016.
- MAETENS, W., INGELS, B., DEFLOOR, W., CAUWENBERGHS, K. 2014. Optimization of the Standardized Precipitation Index (SPI) for operational drought monitoring. In: *EGU Leonardo Conference Series on the Hydrological Cycle: 6th Leonardo Conference 2014: HYPER Droughts: Hydrological, Precipitation, Evaporation, Runoff Droughts* (Prague, CZ, 13-14 November 2014, book of abstracts).
- MAKRA, L., HORVÁTH, S., PONGRÁCZ, R., MIKA, J. 2002. Long term climate deviations: An alternative approach and application on the Palmer drought severity index in Hungary. In: *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 27, Is. 23-24, p. 1063-1071.
- MCKEE, T.B., DOESKEN, N.J., KLEIST, J., 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Anaheim, CA.
- MIKA, J., HORVÁTH, S., MAKRA, L., DUNKEL, Z. 2005. The Palmer Drought Severity Index (PDSI) as an indicator of soil moisture. In: *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 30, Is. 1-3, p. 223-230.
- MISHRA, A., SINGH, V. 2010. A review of drought concepts. In: *Journal of Hydrology*. Vol. 391, Is. 1-2, p. 202-216.
- PATASSIOVÁ, M., KLEMENTOVÁ, E., LITSCHMANN, T., ČISTÝ, M. 2002. Výskyt sucha a analýzy zrážok pri jeho výskyte v jarných mesiacoch. In: *Acta Hydrologica Slovaca*. Vol. 3, Is. 1, p. 61-69.
- PONGRÁCZ, R., BARTHOLY, J., KIS, A. 2014. Estimation of future precipitation conditions for Hungary with special focus on dry periods. In: *Időjárás*, Vol. 118, Is. 4, p. 305-321.
- POTOP, V., BORONEANT, C., MOŽNÝ, M., ŠTĚPÁNEK, P., SKALÁK, P. 2012a. Spatial and temporal evolution of drought conditions at various time scales in the Czech Republic during growing period. In: *Időjárás*, Vol. 116, Is. 4, p. 281-295.
- POTOP, V., MOŽNÝ, M., SOUKUP, J. 2012b. Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic. In: *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 156, p. 121-133.
- POTOP, V., TÜRKÖTT, L. 2012. Využití standardizovaného srážkového a evapotranspiračního indexu SPEI pro hodnocení vláhových poměrů při pěstování cukrové řepy ve středních Čechách. In: *Listy cukrovarnické a řepárské*. Vol. 128, Is. 12, p. 368-373.

- POTOPOVÁ, V., ŠTEPÁNEK, P., MOŽNÝ, M., TÜRKÖTT, L., SOUKUP J. 2015. Performance of the standardised precipitation evapotranspiration index at various lags for agricultural drought risk assessment in the Czech Republic. In: Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 202, p. 23-38.
- SVOBODA, M., FUCHS, B.A., POULSEN, C.C., NOTHWEHR, J.R. 2015. The drought risk atlas: Enhancing decision support for drought risk management in the United States. In: Journal of Hydrology, Vol. 526, p. 274-286.
- SZALAI, S., SZINELL, C., ZOBOKI, J. 2000. Drought monitoring in Hungary. In: Wilhite, D.A., Sivakumar, M.V.K., Wood, D.A. (eds.). 2000. Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management, WMO, p. 182-199.
- ŠAMAJ, F., VALOVIČ, Š. 1972: Suché a vlhké obdobie na Slovensku. In: Balco, M. Malá vodnosť slovenských tokov, 1990, Veda, Bratislava.
- TAKÁČ, J. 2015. Suchov poľnohospodárskej krajiny. Bratislava: Národné poľnohospodárske a potravinárske centrum – Výskumný ústav pôdozvedectva a ochrany pôdy, 69 s.
- VICENTE-SERRANO, S.M., BEGUERIA, S., LOPÉZ-MORENO, J.I. 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. In: Journal of Climate. Vol. 23, Is. 7, p. 1696-1718.
- ZÁHRADNÍČEK, P., ŠTEPÁNEK, P., TRNKA, M., FARDA, A. 2016. Projevy změny klimatu na území České republiky. In: Půdní a zemědělské sucho (28. – 29.4.2016 Kutná Hora, ČR). Eds. Rožnovský, J., Vopravil, J. Praha: Výskumný ústav meliorací a ochrany půdy.