

**HODNOTENIE SUCHA POMOCOU
METEOROLOGICKÝCH INDEXOV PRE LOKALITU NITRA**

Peter Šurda, Peter Rončák, Justína Vitková, Andrej Tárník

Prejavy sucha sa v posledných rokoch stali závažnejšími v dôsledku klimatickej zmeny. Schopnosť monitorovať podmienky vzniku sucha a hodnotiť jeho riziko je nevyhnutné pre vytvorenie účinného plánu adaptácie na suchu, najmä pre poľnohospodárske ekosystémy. Indexy sucha umožňujú charakterizáciu jeho výskytu a rozsahu, pričom najpoužívanejším indexom je štandardizovaný zrážkový index (SPI), ktorý odporúča Svetová meteorologická organizácia ako štandardný index sucha. Hoci hlavnou príčinou sucha je nedostatočná zrážková činnosť, nedávne štúdie poukázali aj na významnú úlohu teploty vzduchu a evapotranspirácie.

Cieľom práce bolo stanoviť mesačné hodnoty meteorologických indexov sucha pre výskumnú lokalitu Nitra v časovom horizonte 2004 – 2018 a analyzovať ich citlivosť na základe porovnania početnosti podľa nich stanovených suchých mesiacov. Použité boli indexy: SPI (štandardizovaný zrážkový index), PN (percentá normálu), DI (decily), MCZI (modifikovaný z-index) a ZSI (z-index), ktoré berú do úvahy hodnoty a rozdelenie denných zrážkových úhrnov. Druhotným cieľom práce bolo analyzovať a štatisticky potvrdiť vzťah medzi denným priebehom indexu EDI (efektívne sucho) a v dennom intervale meranou hodnotou vlhkosti hornej časti pôdneho profilu výskumnej lokality, t.j. potvrdiť možnosť použitia EDI pri signalizovaní rizika pôdneho sucha.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ: meteorologické indexy sucha, pôdne sucho, Nitra

REGIONAL DROUGHT ASSESSMENT BASED ON THE METEOROLOGICAL INDICES FOR LOCALITY NITRA. In recent years the droughts have become more severe as a result of climate change. The ability to monitor drought conditions and assess its risk is essential for an effective drought adaptation plan, especially in agricultural ecosystems. Drought indices allow characterization of drought occurrence and extent. The most widely used is the Standardized Precipitation Index (SPI), which is recommended by the World Meteorological Organization as the standard drought index. Although the main cause of drought is lack of rainfall, recent studies have also pointed out the significant role of air temperature and evapotranspiration.

The aim of the work was to determine the monthly values of the meteorological drought indexes of the research site Nitra in the period 2014–2018 and to analyze their sensitivity based on the comparison of the determined droughts frequency. We used indexes: SPI (Standardized Precipitation Index), PNI (Percent of Normal Index), DI (Deciles index), MCZI (Modified CZI) and ZSI (Z-score Index), which take into account the values and distribution of daily precipitation amounts. The secondary aim of the work was to analyze and statistically confirm the relationship between daily EDI (Effective Drought Index) and in daily interval measured moisture content of the top soil of the research site, i.e. to confirm the possibility of using EDI to signal the soil drought risk.

KEY WORDS: meteorological indices of drought, soil drought, Nitra

Úvod

V nedávnej minulosti zažila Európa viaceré závažné obdobia sucha, a to nielen v semiaridných oblastiach Pyrenejského polostrova a v stredomorských regiónoch, ale na takmer celom jej území, od západnej po východnú Eu-

rópu, až po juh Škandinávie. Európske letné horúčavy v roku 2003 v kombinácii s predchádzajúcim predĺženým obdobím sucha spôsobili rozsiahly nedostatok plodín v častiach južnej Európy s celkovými škodami vo výške takmer 15 miliárd EUR (García-Herrera a kol., 2010). Koncom roka 2018 čelili časti severnej a strednej Európy

obdobiu nezvyčajne horúceho počasia, ktoré viedlo k rekordne vysokým teplotám a suchu (Euractiv, 2018). Sucho sa v posledných rokoch stalo významnou témou výskumu aj na Slovensku. V práci Zuzulová a kol. (2014) bol hodnotený vývoj sucha na Slovensku počas obdobia rokov 1951 – 2010 a stanovený klesajúci trend Palmerovho indexu závažnosti sucha pre SR za obdobie rokov 1951 – 1980 a stúpajúci trend pre interval rokov 1981 – 2010. V príspevku Vido a kol. (2015) bol sledovaný výskyt sucha vo vyšších nadmorských výškach na území Tatranského národného parku, významnej biologickej rezervácie stredoeurópskej fauny a flóry. Výsledky potvrdili, že frekvencia výskytu sucha v skúmanom území má cyklický charakter s približne 30-ročným obdobím opakovania. Podľa Takáča a kol. (2014) suché obdobia v rokoch 2012 a 2013 významnou mierou a vo veľkom plošnom rozsahu ovplyvnili produkciu plodín v poľnohospodárskych regiónoch Slovenska. Štúdia Nikolovej a kol. (2016) potvrdila rastúci trend výskytu závažného alebo extrémneho sucha v letnom období pre väčšinu skúmaných staníc v oblastiach nížin SR. V práci Vido a kol. (2016) bola analyzovaná fyziologická odozva drevín na strednom Slovensku na najsuchšie mesiace roku 2012. Šustek a kol. (2017) zdokumentoval vplyv suchého obdobia roku 2012 na pokles počtu druhov chrobákov na území Vysokých Tatier. Brezianská a kol. (2018), analyzovala výskyt sucha a znížených zásob pôdnej vody na lokalitách Záhorskej nížiny v období rokov 1961 – 2010. Fendeková a kol. (2018) skúmala časové rady údajov o prietokoch z dvanástich povodí na Slovensku v období rokov 1981 – 2015. Analýza zložiek vodnej bilancie za obdobie 1931 – 2016 dokázala, že v dôsledku neustáleho zvyšovania teploty vzduchu a evapotranspirácie dochádza k poklesu odtoku v rámci povodí Slovenska. Vo všeobecnosti je možné sucho klasifikovať na základe meteorologického, hydrologického, poľnohospodárskeho a socioekonomického prístupu. Možno konštatovať, že pretrvávajúce meteorologické sucho počas dlhšieho obdobia vedie k poľnohospodárskym a sociálno-ekonomickým dôsledkom. Nenasýtená zóna pôdy je integrálnou a dynamickou súčasťou hydrologického cyklu. Pôda je prvou zložkou Zeme, ktorá interaguje s atmosférickými meteorologickými javmi, infiltruje zrážky a transportuje ich do hlbších vrstiev profilu alebo opačným smerom do atmosféry prostredníctvom výparu. Pôdne sucho (nízka úroveň pôdnej vlhkosti) priamo ovplyvňuje rast a výnosy poľnohospodárskych plodín (Ciais a kol., 2005) a preto sa označuje aj ako poľnohospodárske sucho. Poľnohospodárske sucho je stavom, kedy dochádza k poškodeniu vegetácie a zhoršeniu ekologického zdravia územia, ktorý spôsobuje nízka úroveň pôdnej vlhkosti v koreňovej zóne v dôsledku zvýšenej evapotranspirácie (Otkin a kol., 2018). Vzhľadom na nedostatok priamo meraných hodnôt vlhkosti pôdy a na ťažkosti s ich priestorovou extrapoláciou boli vyvinuté alternatívne spôsoby charakterizácie stavu pôdneho sucha. Najbežnejší prístup využíva indexy sucha odvodené z klimatických charakteristík (Dai a kol., 2004; Mika a kol., 2005), zatiaľ čo iné prístupy sú založe-

né na princípe diaľkového prieskumu Zeme a na simulačných modeloch.

Veľké množstvo literatúry sa zaoberá monitorovaním sucha, ktoré sa vykonáva prostredníctvom indexov sucha, normalizovaných štatistických ukazovateľov odvodených z časových radov zrážkovo-deficitných období (Mishra a Singh, 2010). Populárnymi a pomerne často používanými indexmi sucha, odvodenými od zrážkových úhrnov sú SPI (Standardized Precipitation Index), PNI (Percent of Normal Index), DI (Deciles Index), EDI (Effective Drought Index) (Byun a Wilhite, 1999; Deo, 2011), MCZI (modified CZI) a ZSI (Z-Score Index). Indexy sucha sa stanovujú kombináciou klimatických a meteorologických premenných, z ktorých najdôležitejšími pri definovaní veľkosti a intenzity sucha sú denné zrážkové úhrny (Alley, 1984; Chang a Kleopa, 1991).

Cieľom predkladanej práce bolo: i) stanoviť mesačné hodnoty meteorologických indexov sucha výskumnej lokality Nitra v časovom horizonte 2004 – 2018; ii) analyzovať a štatisticky potvrdiť vzťah medzi denným priebehom indexu EDI (efektívne sucho) a hodnotou vlhkosti hornej časti pôdneho profilu výskumnej lokality meranou v dennom intervale.

Materiál a metódy

Experimentálna lokalita a databáza zrážkových úhrnov

Priame meranie vlhkosti pôdy (θ) prebehlo na experimentálnej lokalite Slovenskej poľnohospodárskej univerzity Dolná Malanta, ktorá je situovaná v rámci geomorfologickej jednotky Podunajská pahorkatina v časti Nitrianskej pahorkatiny (obr. 1). Morfologicko-morfometrický typ reliéfu je mierne až stredne členitá pahorkatina. Zastúpenosť pôd: hnedozeme kultizemné, lokálne modálne a regozeme kultizemné a modálne karbonátové, zo spraši, zrnitostne hlinité.

Malanta spadá pod klimatickú oblasť teplú, mierne suchú s miernou zimou (Atlas krajiny SR, 2002). Základným súborom vstupných údajov boli denné zrážkové úhrny (H_z), ktoré boli merané na meteorologickej stanici Katedry biometeorológie a hydrológie SPU Nitra za obdobie 2004 – 2018.

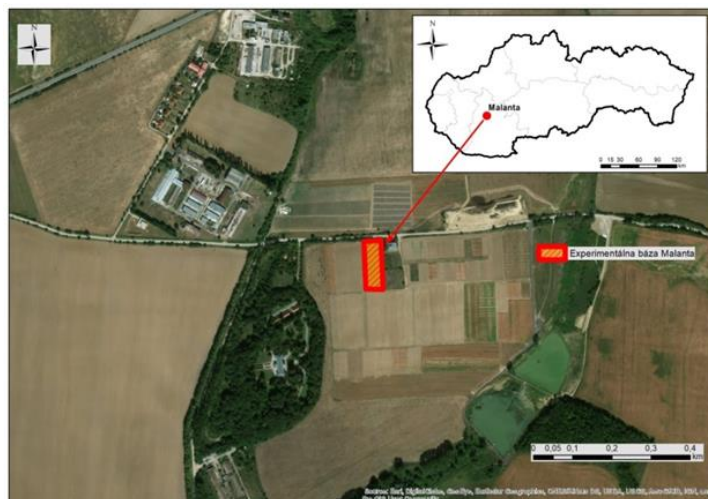
Metodika merania pôdnej vlhkosti

Meranie objemovej vlhkosti pôdy bolo realizované použitím dielektrických senzorov 5TM od firmy Decagon Devices, ktoré boli inštalované do hĺbky 5 – 10 cm pod povrchom terénu. Na sledovanej, poľnohospodársky využívannej ploche boli umiestnené 4 senzory. Kontinuálne merania v 5-minútových intervaloch boli zaznamenávané použitím datalogerov EM50 (od firmy Decagon Devices).

Meteorologické indexy sucha

SPI (štandardizovaný index zrážok)

SPI je najpopulárnejším indexom sucha, vo vedeckých



Obr. 1. Experimentálna báza Malanta pri Nitre

Fig. 1. Experimental base Malanta near Nitra

kruhoch veľmi často používaným na charakterizáciu meteorologických období sucha. McKee a kol. (1995) definoval SPI pre rôzne časové intervaly (1, 3, 6, 12, 24 a 48 mesiacov), pričom stanovené hodnoty sa pohybovali v intervale od $-2,0$ do $2,0$. Keďže údaje o zrážkových úhrnoch majú gama rozdelenie, SPI sa vypočíta nasledovne s použitím distribučnej funkcie gama rozdelenia:

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

kde

$\Gamma(\alpha)$ – funkcia gama,

x – zrážkový úhrn ($x > 0$), [mm],

α – parameter tvaru ($\alpha > 0$),

β – parameter mierky ($\beta > 0$).

Viac podrobností možno nájsť v publikáciách Edwards a McKee (1997) a Dogan a kol. (2012).

PNI (percentá normálu)

Index PNI popísal Willeke a kol. (1994) ako percento normálu časového radu zrážkových úhrnov. Môže byť počítaný pre rôzne časové intervaly (mesačné, sezónne a ročné). Zistilo sa, že PNI je pomerne účinným indexom pri opise sucha v rámci jedného regiónu alebo počas jednej sezóny (Hayes, 2006).

Hodnota PNI sa vypočíta ako:

$$PNI = \frac{P_i}{P} \times 100 \quad (2)$$

kde

P_i – zrážkový úhrn skúmaného časového intervalu [mm],

P – hodnota normálu (obvykle 30-ročného radu) zrážkového úhrnu skúmaného obdobia [mm].

DI (decily)

Index DI bol definovaný ako klasifikácia zrážkových úhrnov v určitom časovom intervale v rámci celého skúmaného obdobia (Gibbs a Maher, 1967). Konkrétne sú mesačné údaje o historických zrážkach triedené od najnižších po najvyššie a sú rozdelené do desiatich rovnakých kategórií alebo decilov. Zrážky v danom mesiaci tak môžu byť zaradené do historického kontextu prostredníctvom decilov.

MCZI (modifikovaný z-index)

Národné klimatické centrum v Číne vyvinulo CZI v roku 1995 ako alternatívu k SPI (Ju a kol., 1997). Za predpokladu, že priemerné zrážkové úhrny majú Pearsonovo rozdelenie III. typu, CZI sa počíta ako:

$$CZI_{ij} = \frac{6}{C_{si}} \times \left(\frac{C_{si}}{2} \times \varphi_{tj} + 1 \right)^{1/3} - \frac{6}{C_{si}} + \frac{C_{si}}{6} \quad (3)$$

kde

i – sledované časové rozpätie,

j – aktuálny mesiac,

CZI_{ij} – vyjadruje sumu hodnôt CZI aktuálneho mesiaca j za obdobie i ,

C_{si} – koeficient šikmosti,

φ_{tj} – štandardizovaná variancia.

MCZI sa počíta použitím vyššie uvedeného vzorca (3), s tým rozdielom, že medián zrážkového úhrnu je nahradený hodnotou aritmetického priemeru.

ZSI (z-súčet)

Index ZSI býva v odborných kruhoch občas zamieňaný

s SPI. Tento index sucha je skôr analógiou k CZI, nepracuje však s gama ani s Pearsonovým rozdelením údajov o zrážkových úhrnoch. ZSI možno vypočítať podľa nasledujúcej rovnice:

$$ZSI = \frac{P_i - \bar{P}}{SD} \quad (4)$$

kde

\bar{P} – priemerný mesačný úhrn zrážok [mm],
 P_i – zrážkový úhrn v konkrétnom mesiaci [mm],
 SD – smerodajná odchýlka zrážkových úhrnov počas hodnoteného časového intervalu [mm].

EDI (efektívne sucho)

EDI sa počíta v dennom časovom kroku a jeho hodnoty sa vo finálnom kroku štandardizujú podobným spôsobom ako hodnoty SPI. EDI odvodili Byun a Wilhite (1999), ktorí sa snažili prekonať niektoré obmedzenia existujúcich indexov sucha. Hodnota EDI sa vo všeobecnosti pohybuje v rozsahu od -2,5 do 2,5. Hodnoty v rozsahu od -1,0 do 1,0 sú blízke normálu, zatiaľ čo podmienky pre extrémne sucha sú indikované hodnotami EDI menšími alebo rovnými -2,0.

Predpokladom odvodenia EDI je výpočet efektívnej zrážky počas zvoleného časového obdobia. Pre účely tejto práce bola vybraná 365-denná efektívna zrážka (EP_{365}) a lineárna redukčná funkcia, predstavujúca rovnomerný úbytok vodných zdrojov počas celého roka:

$$EP_i = \sum_{n=1}^i \left[\left(\sum_{m=1}^n H_{z_m} \right) / n \right] \quad (5)$$

kde

i – počet dní, ktorých zrážkový úhrn sa zahŕňa do výpočtu EP [-],
 H_{z_m} – zrážkový úhrn m -dní pred prvým dňom zahrnutým do výpočtu EP [mm].

Zrážkové úhrny z predchádzajúcich dní hodnoteného obdobia sú k celkovým zásobám vody pripočítavané vo forme ich priemernej hodnoty. V prípade, že $i = 2$, potom $m = [1, 2]$, následne:

$$EP_2 = [Hz_1 + (Hz_1 + Hz_2) / 2] \quad (6)$$

Pre potreby komplexnej diagnostiky sucha je nutné index EP doplniť ďalšími odvodenými hodnotami. Prvou je hodnota dlhodobého priemeru EP pre každý deň kalendárneho roka (MEP). V práci bola priemerná hodnota efektívnej zrážky a jej štandardná odchýlka $st(EP)$ vypočítaná zo 14-ročného radu EP_{365} (obdobie 2004 – 2018).

S ohľadom na dlhodobý priemer možno prebytok alebo nedostatok vodných zdrojov (DEP) pre každý deň analyzovaného obdobia vyhodnotiť podľa rovnice:

$$DEP = EP - MEP \quad (7)$$

Ak hodnotu DEP podelíme štandardnou odchýlkou EP pre konkrétny kalendárny deň, potom výsledná štandardizovaná hodnota deficitu vody v hydrologickom systéme (EDI) je porovnateľná s inými lokalitami, prakticky celosvetovo.

$$EDI = DEP / st(EP) \quad (8)$$

kde

$st(EP)$ – smerodajná odchýlka od EP pre konkrétny kalendárny deň.

Štatistická analýza

Časové rady odvodených indexov sucha boli medzi sebou porovnané pomocou Pearsonovho korelačného koeficientu. Rozsah hodnoty korelačného koeficienta je -1 až 1. Hodnoty blízke -1 indikujú silný negatívny vzťah (vysoké hodnoty jednej premennej všeobecne indikujú nízke hodnoty druhej). Hodnoty blízke 1 indikujú silný pozitívny vzťah (vysoké hodnoty jednej premennej všeobecne indikujú vysoké hodnoty druhej). Hodnoty koeficienta korelácie blízke 0 dokazujú neexistenciu lineárneho vzťahu medzi týmito dvoma premennými.

Výsledky a diskusia

Použitím súboru vstupných údajov o denných zrážkových úhrnoch z meteorologickej stanice Nitra za obdobie 2004 – 2018 boli zostavené časové rady mesačných hodnôt 5-tich meteorologických indexov, prostredníctvom ktorých bol zhodnotený výskyt a rozsah sucha v sledovanom období.

Hodnotenie sucha v mesačnom časovom intervale

Priebeh vypočítaných hodnôt indexu SPI je zobrazený na obr. 2. Hodnoty oscilujúce medzi 0,99 a -0,99 sú hodnotené ako normálne. Hranica závažného sucha predstavuje hodnoty $SPI < -1,5$ a sucho extrémne je signalizované hodnotami $SPI < -2$. Na základe výsledkov hodnotenia podľa tohto indexu sucha sa počas sledovaného obdobia vyskytlo 10 mesiacov závažného sucha; extrémne suché boli 4 mesiace. Najnižšie hodnoty dosiahol SPI počas septembra 2006, novembra 2011, júla 2013 a januára 2017. Najsuchšími rokmi počas sledovaného obdobia boli na základe analýzy výsledkov hodnotenia podľa SPI roky v nasledovnom poradí: 2018 a 2017, 2015, 2012, 2011 a 2006.

Grafická reprezentácia časového radu mesačných hodnôt indexu PNI je na obr. 3. Výskyt závažného sucha predstavuje pokles hodnôt PNI pod 55, extrémne sucho signalizujú hodnoty PNI pod 40. Na obrázku je vidieť, že na rozdiel od indexu SPI hodnota PNI pomerne pravidelne klesá pod úroveň extrémneho sucha, t.j. tento index je citlivejší. Ako extrémne suchých je vyhodnotených až 22 mesiacov. Najnižšie hodnoty PNI dosahuje počas apríla 2007, v novembri 2011, v júli 2013 a v auguste 2018. Najsuchšími boli podľa PNI roky v nasledovnom poradí:

2018, 2015, 2017, 2012 a 2006.

Hodnoty indexu DI sú zobrazené na obr. 4. Hranica závažného sucha je stanovená hodnotou 2, extrémne sucho je zaznamenané keď dosiahne DI hodnotu 1. Citlivosť je tento index nastavený medzi úrovňami SPI a PNI, keďže ako extrémne suchých bolo vyhodnotených 12 mesiacov. Porovnanie extrémne suchých mesiacov medzi sebou navzájom nie je v prípade decilov možné, keďže hodnota DI je = 1 (prvý decil). Najsuchšími boli podľa DI roky v nasledovnom poradí: 2018, 2017, 2015, 2012 a 2006.

Priebeh vypočítaných hodnôt indexu MCZI je na obr. 5. Hranica závažného sucha predstavuje hodnoty MCZI < -1,5 a extrémne sucho je signalizované hodnotami MCZI < -2. Ako extrémne suché boli podľa tohto indexu vyhodnotené len 2 mesiace, čo je najmenej zo všetkých hodnotených indexov a MCZI je teda najmenej citlivým indexom. Najnižšie hodnoty MCZI dosahuje v septembri 2006, apríli 2007, v novembri 2011, v januári 2017. Najsuchšími boli podľa MCZI roky v nasledovnom poradí: 2018, 2017, 2015, 2006 a 2012.

Hodnoty indexu ZSI sú zobrazené na obr. 6. Výskyt závažného sucha predstavuje pokles hodnôt ZSI pod -0,84, základe výsledkov hodnotenia podľa tohto indexu sa počas sledovaného obdobia vyskytlo 13 extrémne suchých mesiacov, čím mu pripadá stredná citlivosť úroveň v porovnaní s ostatnými hodnotenými indexmi. Najnižšie hodnoty dosiahol ZSI počas septembra 2006, apríla 2007, novembra 2011, júla 2013 a januára 2017. Najsuchšími rokmi počas sledovaného obdobia boli na zák-

lade analýzy výsledkov hodnotenia podľa ZSI roky v tomto poradí: 2018 a 2017, 2015, 2012, 2006 a 2004.

Mieru odlišnosti medzi jednotlivými IS popisujú vypočítané hodnoty korelačných koeficientov. Pearsonove koeficienty hodnotiace koreláciu medzi všetkými indexmi odvodenými zo súboru údajov o zrážkových úhrnoch sú uvedené v tabuľke 1. Bodové diagramy zobrazujúce typ vzťahu medzi hodnotenými indexmi sú uvedené na obr. 7. Na základe hodnôt korelačných koeficientov (od 0,9301 do 0,9962) a grafického zobrazenia bodových diagramov, môže byť konštatovaná vysoká miera korelácie medzi všetkými hodnotenými indexmi. Rozdiely sa prejavili v citlivosti jednotlivých indexov, t.j. v rozdielnom počte mesiacov hodnotených ako závažne, či extrémne suchých.

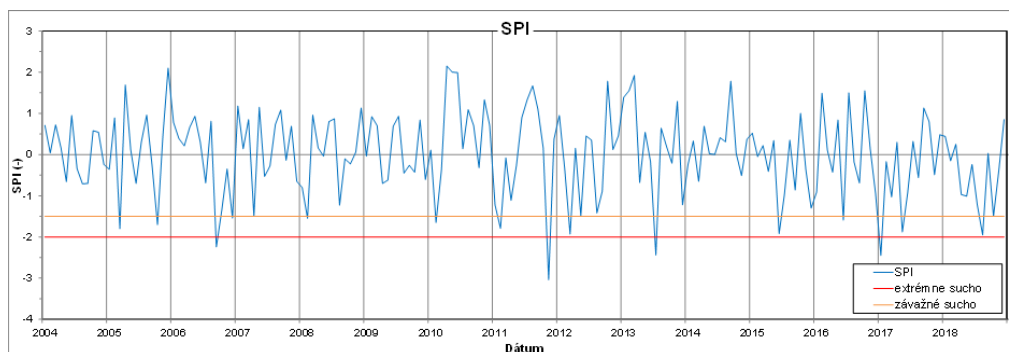
Hodnotenie sucha v dennom časovom intervale

Predpokladom odvodu EDI je výpočet efektívnej zrážky; v prípade predkladanej štúdie bola vybraná 365-denná efektívna zrážka (EP_{365}). Priebeh denných zrážkových úhrnov, index efektívnej zrážky EP_{365} a jeho dlhodobá priemerná hodnota pre konkrétny kalendárny deň MEP sú graficky znázornené na obr. 8.

Grafická prezentácia deficitu alebo nadbytku vodných zdrojov (DEP) pre každý deň analyzovaného obdobia je na obr. 9. Prostredníctvom tohto indexu je možné identifikovať suché obdobia v dennom kroku. Na základe obr. 9 možno konštatovať, že suché obdobia prevládali

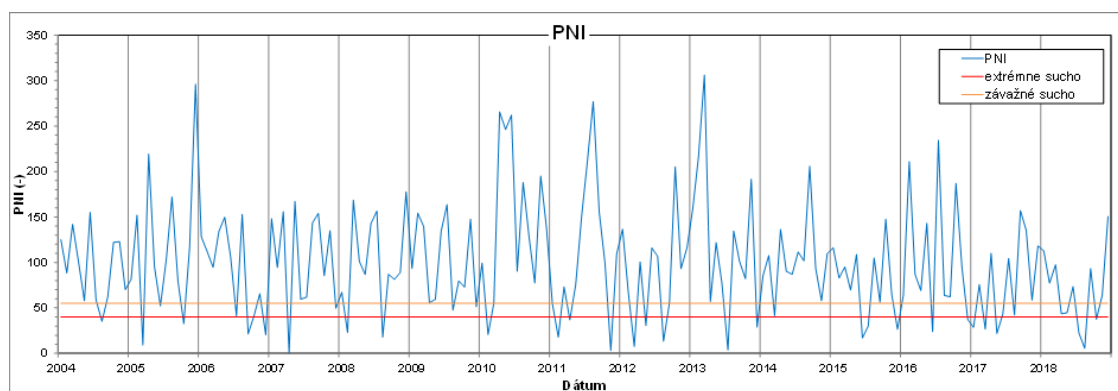
Tabuľka 1. Korelačné koeficienty medzi hodnotenými meteorologickými indexmi sucha
Table 1. Correlation coefficients between assessed meteorological drought indices

PEARSON	SPI	PNI	DI	MCZI	ZSI
SPI	1	0,9898	0,9563	0,9756	0,9962
PNI	0,9898	1	0,9301	0,9528	0,9822
DI	0,9563	0,9301	1	0,9572	0,9497
MCZI	0,9756	0,9528	0,9572	1	0,9693
ZSI	0,9962	0,9822	0,9497	0,9693	1



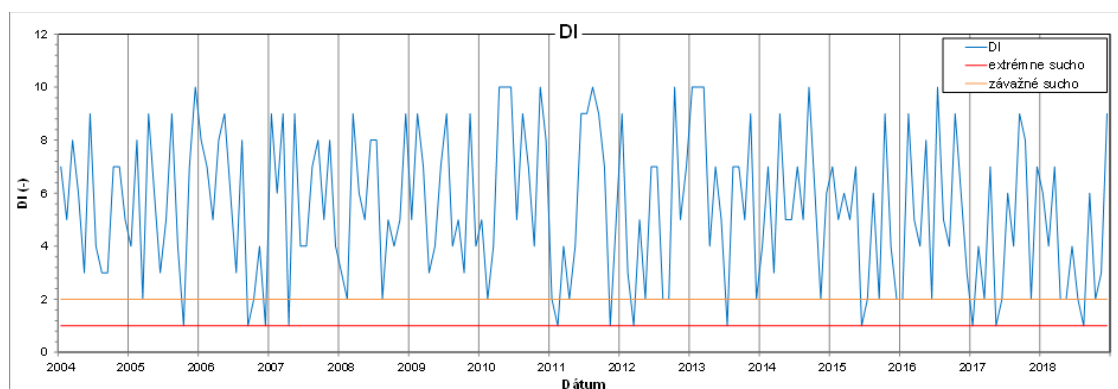
Obr. 2. Hodnoty indexu SPI pre skúmanú lokalitu za obdobie 2004 – 2018; hranica závažného a extrémneho sucha.

Fig. 2. SPI index values for the investigated site in the period 2004–2018; severe and extreme drought boundary.



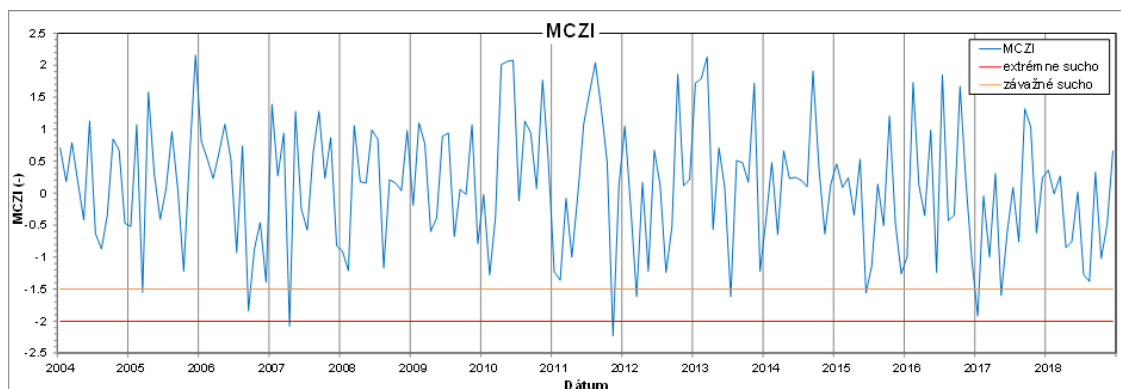
Obr. 3. Hodnoty indexu PNI pre skúmanú lokalitu za obdobie 2004 – 2018; hranica závažného a extrémneho sucha.

Fig. 3. PNI index values for the investigated site in the period 2004–2018; severe and extreme drought boundary.



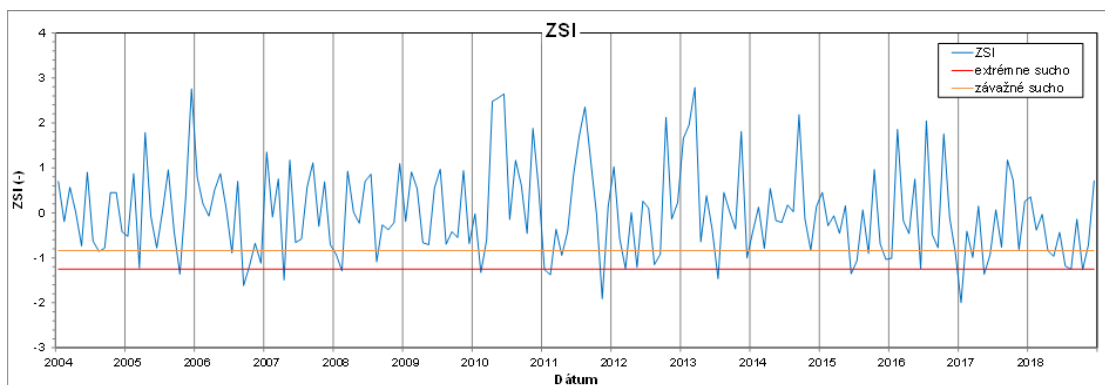
Obr. 4. Hodnoty indexu DI pre skúmanú lokalitu za obdobie 2004 – 2018; hranica závažného a extrémneho sucha.

Fig. 4. SPI index values for the investigated site in the period 2004–2018; severe and extreme drought boundary.



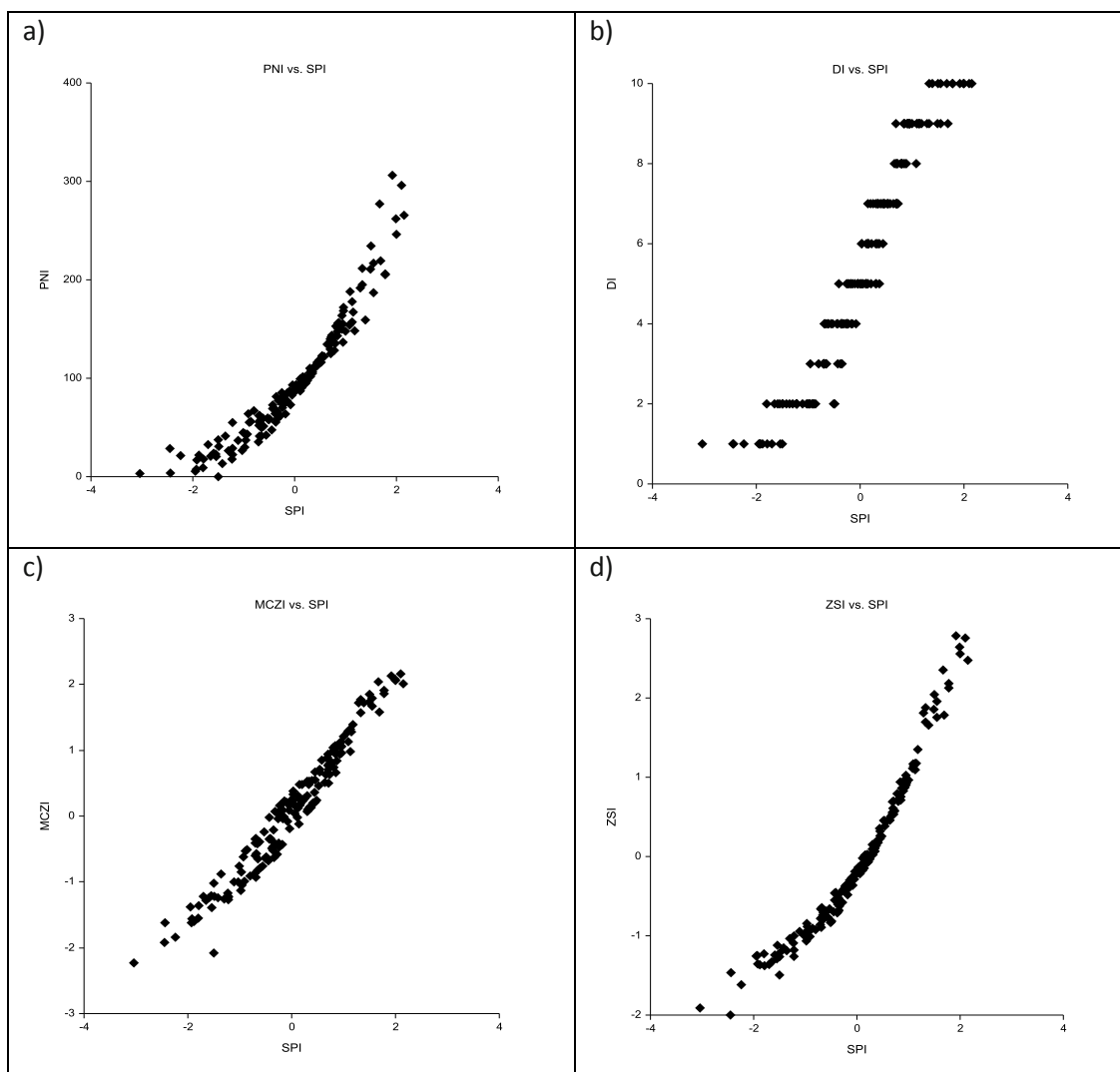
Obr. 5. Hodnoty indexu MCZI pre skúmanú lokalitu za obdobie 2004 – 2018; hranica závažného a extrémneho sucha.

Fig. 5. MCZI index values for the investigated site in the period 2004–2018; severe and extreme drought boundary.



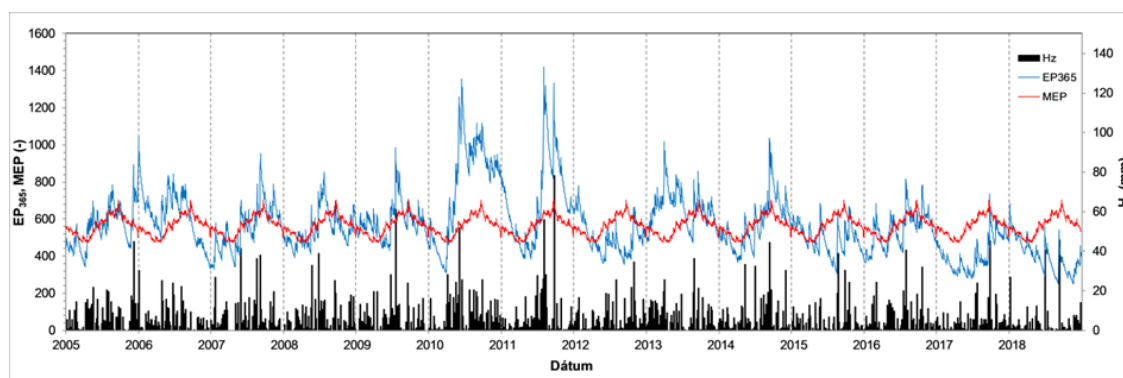
Obr. 6. Hodnoty indexu ZSI pre skúmanú lokalitu za obdobie 2004 – 2018; hranica závažného a extrémneho sucha.

Fig. 6. ZSI index values for the investigated site in the period 2004–2018; severe and extreme drought boundary.



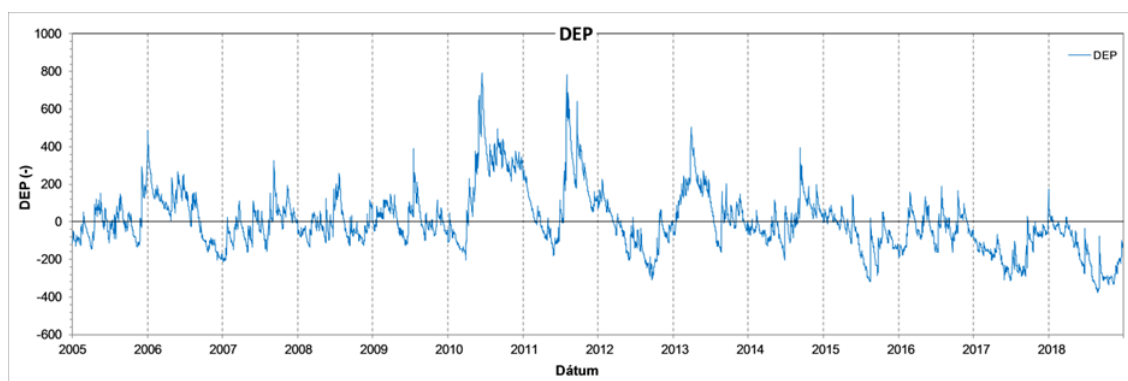
Obr. 7. Bodové diagramy vyjadrujúce korelačný vzťah medzi hodnotami a) SPI vs. PNI; b) SPI vs. DI; c) SPI vs. MCZI; d) SPI vs. ZSI.

Fig. 7. Scatter plots expressing the correlation relationship a) SPI vs. PNI; b) SPI vs. DI; c) SPI vs. MCZI; d) SPI vs. ZSI.



Obr. 8. Denné hodnoty Hz, MEP a EP₃₆₅ pre meteorologickú stanicu Nitra za obdobie 2005 – 2018.

Fig. 8. Daily values of Hz, MEP and EP₃₆₅ for the weather station Nitra in the period 2005–2018.



Obr. 9. Denné hodnoty indexu DEP pre meteorologickú stanicu Nitra za obdobie 2005 – 2018.

Fig. 9. Daily values of DEP index for the meteorological station Nitra in the period 2005–2018.

počas rokov 2018, 2017 a 2015. Ako suchý môže byť hodnotený aj koniec roka 2006 a začiatok rokov 2010 a 2011. Index DEP poskytuje detailnejší pohľad na vývoj sucha ako mesačné indexy. Korelácia medzi DEP a mesačnými hodnotami IS nebola počítaná vzhľadom na rozdielny časový krok hodnotenia. Prebehlo však zhodnotenie korelácie medzi denným priebehom indexu DEP a v dennom intervale meranou hodnotou vlhkosti hornej časti (10 cm) pôdného profilu výskumnej lokality. Objemová vlhkosť bola meraná v 5-min. intervaloch počas dvoch období: 12.8. – 22.10.2015 a 14.6. – 20.7.2016.

Na obr. 10a) sú denné zrážkové úhrny a dynamika pôdnej vlhkosti v horizonte 0 – 10 cm spolu s hodnotami indexu deficitu vodných zdrojov DEP a indexu efektívnej zrážky EP₃₆₅ pre prvé obdobie a na obr. 10b) pre druhé obdobie. Priebeh indexov EP a DEP má podobný charakter ako merané hodnoty objemovej vlhkosti pôdy, pričom stanovené indexy citlivejšie reagujú na rozdelenie zrážkových úhrnov. Hodnoty korelačných koeficientov sú uvedené v tab. 2. Hodnoty Pearsonovho koeficientu sa pohybujú od 0,8230 do 0,9745, čo predstavuje pomerne silnú koreláciu medzi hodnotenými súbormi. Možno teda konšta-

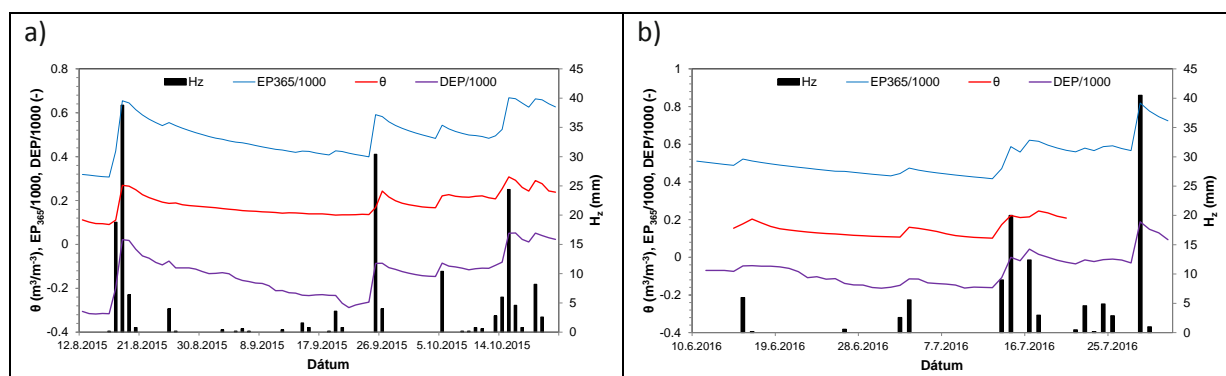
tovať, že možnosť použitia EP₃₆₅ a DEP pri signalizovaní rizika pôdného sucha bola v podmienkach experimentu potvrdená.

Na obr. 11 je priebeh výsledného štandardizovaného indexu deficitu vody v hydrologickom systéme (EDI), ktorý zabezpečuje porovnateľnosť výsledkov s inými lokalitami. Hranica závažného sucha predstavuje hodnoty

Tabuľka 2. Korelačné koeficienty medzi hodnotenými meteorologickými indexmi sucha (EP₃₆₅, DEP) a meranými hodnotami vlhkosti pôdy (θ)

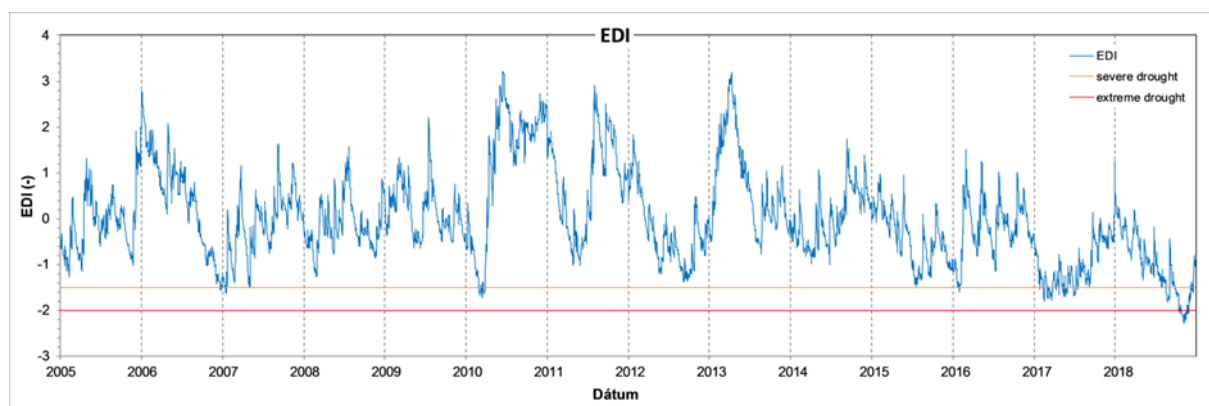
Table 2. Correlation coefficients between assessed meteorological drought indices (EP₃₆₅, DEP) and measured values of soil moisture (θ)

PEARSON	DEP	EP ₃₆₅	θ
DEP	1	0,9745	0,8230
EP ₃₆₅	0,9745	1	0,8478
θ	0,8230	0,8478	1



Obr. 10. a) Denné zrážkové úhrny (H_z), dynamika pôdnej vlhkosti (θ) v horizonte 0 – 10 cm, indexu DEP a EP_{365} v období 12.8. – 22.10.2015; b) v období 14.6. – 20.7.2016.

Fig. 10. a) Daily precipitation totals (H_z), soil moisture dynamics (θ) in the 0–10 cm soil horizon, DEP and EP_{365} in the period 12.8.–22.10.2015; b) in the period 14.6–20.7.2016.



Obr. 11. Denné hodnoty indexu EDI pre meteorologickú stanicu Nitra za obdobie 2005 – 2018.

Fig. 11. Daily values of EDI index for the meteorological station Nitra in the period 2005–2018.

$\text{EDI} < -1,5$ a extrémne sucho je signalizované hodnotami $\text{EDI} < -2$. Ako extrémne suché bolo podľa tohto indexu vyhodnotených len 1 obdobie počas roka 2018. Hranica závažného sucha bola prekročená v rokoch 2007, 2010, 2016, 2017 a 2018. Na základe tohto hodnotenia možno potvrdiť, že rok 2018 (najmä jeho koniec) bol najextrémnejším z hľadiska prejavov sucha za hodnotené obdobie, hodnoty indexov boli niekoľkonásobne nižšie ako hodnoty normálové.

Záver

Cieľom prekladaného príspevku bolo stanoviť a porovnať mesačné hodnoty meteorologických indexov sucha na výskumnej lokalite Nitra v časovom horizonte 2004 – 2018.

Vypočítané boli časové rady mesačných hodnôt 5-tich meteorologických indexov (SPI, PNI, DI, MCZI a ZSI), prostredníctvom ktorých bol zhodnotený výskyt a rozsah sucha v sledovanom období. Najsuchšími rokmi počas sledovaného obdobia boli na základe analýzy výsledkov hodnotenia roky v nasledovnom poradí: 2018 a 2017,

2015, 2012 a 2006. Na základe hodnôt korelačných koeficientov (od 0,9301 do 0,9962) môže byť konštatovaná vysoká miera korelácie medzi všetkými hodnotenými indexmi. Rozdiely sa prejavili v ich citlivosti, t.j. v rozdielnom počte mesiacov vyhodnotených ako závažné, či extrémne suchých. Pri hodnotení meteorologického sucha autori odporúčajú použiť index SPI z dôvodu existencie množstva výsledkov, poskytujúcich možnosti porovnania jednotlivých lokalít z dôvodu pomerne jednoduchého spôsobu výpočtu a vhodnej citlivosti indexu. Deficit alebo nadbytok vodných zdrojov v dennom časovom intervale bol hodnotený prostredníctvom konceptu „efektívnych zrážok“. Podľa hodnotenia indexu DEP suché obdobia prevládali počas rokov 2018, 2017 a 2015. Ako suchý môže byť hodnotený aj koniec roka 2006 a začiatok rokov 2010 a 2011. Index DEP poskytuje detailnejší pohľad na vývoj sucha ako mesačné indexy. Hodnoty korelačného koeficientu medzi EP_{365} a DEP a meranými hodnotami objemovej vlhkosti pôdy potvrdili možnosť použitia týchto indexov pri signalizovaní rizika pôdneho sucha.

Najnižšie hodnoty štandardizovaného indexu deficitu vo-

dy v hydrologickom systéme (EDI) boli stanovené pre rok 2018 (najmä jeho koniec) a toto obdobie bolo aj celkovo najextrémnejším z hľadiska prejavov sucha podľa všetkých použitých metodík, kedy hodnoty stanovených indexov boli niekoľkonásobne nižšie ako hodnoty normálové.

Pod'akovanie

Tento príspevok bol vytvorený s finančnou podporou z projektov Vedeckej grantovej agentúry VEGA 2/0189/17a Agentúry na podporu výskumu a vývoja APVV-15-0160 a realizáciou projektu ITMS 26210120009: Dobudovanie infraštruktúry hydrologických výskumných staníc, na základe podpory operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

- Alley, W. M. (1984): The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. *Journal of Applied Meteorology*, 23, 7, 1100–1109.
- Atlas krajiny Slovenskej republiky. (2002): Bratislava: Ministerstvo životného prostredia SR a Banská Bystrica: Slovenská agentúra životného prostredia, 344.
- Brezianská, K., Vitková, J., Šurda, P. (2018): Analýza sucha a vplyv klimatických zmien na zásobu vody v pôde na Záhorskej nížine. In *Aktuálne problémy zóny aerácie pôdy v podmienkach prebiehajúcej klimatickej zmeny*. - Bratislava : Veda, vydavat. SAV, 307 – 335.
- Byun, H.-R., Wilhite, D. A. (1999): Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12, 9, 2747–2756.
- Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N. (2005): Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437, 529–533.
- Dai, A., Trenberth, K. E., Qian, T. (2004): A global dataset of palmer drought severity index for 1870–2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming. *J. Hydrometeorol.*, 5, 1117–1130.
- Deo, R. C. (2011): On meteorological droughts in tropical Pacific Islands: time-series analysis of observed rainfall using Fiji as a case study. *Meteorol Appl* 18, 171–180.
- Dogan, S., Berkay, A., Singh, V. P. (2012): Comparison of multi-monthly rainfall-based drought severity indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 470–471, 255–268.
- Edwards, D. C., McKee, T. B. (1997): Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. In: Department of Atmospheric Sciences, Colorado State University. Atmospheric Science Paper No. 634, Climat. Report No.97–2. Fort Collins.
- Euractiv. (2018): Extreme drought causes EU vegetables 'most serious' crisis in 40 years – EURACTIV.com. <https://www.euractiv.com/section/agriculture-food/news/extreme-drought-causes-eu-vegetables-most-serious-crisis-in-40-years/> (Accessed 14 Sep 2018).
- Fendekova, M., Gauster, T., Labudova, L., Vrablikova, D., Danacova, Z., Fendek, M., Pekarova, P. (2018): Analysing 21st century meteorological and hydrological drought events in Slovakia. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66, 4, 393–403.
- García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, R.M. (2010): A review of the European summer heat wave of 2003. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 40, 267–306.
- Gibbs, W., Maher, J. (1967): Rainfall Deciles as Drought Indicators. Melbourne: Bureau of Meteorology, 117.
- Hayes, M. J. (2006): Drought Indices. Van Nostrand's Scientific Encyclopedia. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Chang, T. J., Kleopa, X. A. (1991): A proposed method for drought monitoring. *Journal of the American Water Resources Association*, 27, 2, 275–281.
- Ju, X. S., Yang, X. W., Chen, L. J. (1997): Research on determination of station indexes and division of regional flood/drought grades in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 8, 1, 26–33.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1995): Drought monitoring with Multiple Time scales. In: *Proceeding of the 9th Conference on Applied Climatology*. Dallas, TX: American Meteorological Society, 233–236.
- Mika, J., Horváth, S., Makra, L., Dunkel, Z., (2005): The Palmer Drought Severity Index (PDSI) as an indicator of soilmoisture. *Phys. Chem. Earth 30 (Parts A/B/C)*, 223–230.
- Mishra, A. K., Singh, V. P. (2010): A review of drought concepts. *J Hydrol.*, 391, 202–216
- Nikolova, N., Nejedlik, P., Lapin, M. (2016): Temporal variability and spatial distribution of drought events in the lowlands of Slovakia. *Geofizika*, 33, 2, 119–135.
- Otkin, J. A., Svoboda, M., Hunt, E. D. (2018): Flash droughts: a review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 99, 911–919.
- Šustek, Z., Vido, J., Škvareninová, J., Škvarenina J., Šurda, P. (2017): Drought impact on ground beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) in Norway spruce forests with different management after windstorm damage – a case study from Tatra Mts. (Slovakia). *J. Hydrol. Hydromech.*, 65, 4, 333–342.
- Takac, J., Moravek, A., Klikusovska, Z., Skalsky, R. (2014): Drought severity in agricultural land of Slovakia in the years 2011–2013. *Mendel and Bioclimatology*, 488–506.
- Vido, J., Tadesse, T., Sustek, Z., Kandrik, R., Hanzelova, M., Skvarenina, J., Skvareninova, J., Hayes, M. (2015): Drought Occurrence in Central European Mountainous Region (Tatra National Park, Slovakia) within the Period 1961–2010. *Advances in Meteorology Article Number: 248728*
- Vido, J., Štelciová, K., Nalevanková, P., Leštianska, A., Kandrik, R., Pástorová, A., Škvarenina, J., Tadesse, T. (2016): Identifying the relationships of climate and physiological responses of a beech forest using the Standardised Precipitation Index: a case study for Slovakia. *J. Hydrol. Hydromech.*, 64, 3, 246–251.
- Willeke, G., Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. (1994): The national drought atlas. In: *Institute for Water Resources Report 94-NDS-4*. U.S Army Corp of Engineers. Norfolk, VA.
- Zuzulová, V., Šiška, B., Vavrovič, J. (2014): Evaluation of drought in Slovakia by the Palmer Drought Severity Index (PDSI) in the conditions of changing climate, in: *Extrémy obehu vody v krajine: Mikulov*, 8. – 9. April 2014, edited by Rožnovský, J., Litschmann, T., Štředa, T. and Štředová, H. ČHMU, Prag

REGIONAL DROUGHT ASSESSMENT BASED ON THE METEOROLOGICAL INDICES FOR LOCALITY NITRA

In recent years the droughts have become more severe as a result of climate change. The ability to monitor drought conditions and assess its risk is essential for an effective drought adaptation plan, especially in agricultural ecosystems. Drought indices allow characterization of drought occurrence and extent. The most widely used is the Standardized Precipitation Index (SPI), which is recommended by the World Meteorological Organization as the standard drought index. Although the main cause of drought is lack of rainfall, recent studies have also pointed to the significant role of air temperature and evapotranspiration.

The aim of the work was to determine the monthly values of the meteorological drought indices for the research site Nitra in the period 2014–2018 and to analyze their sensitivity based on the comparison of the determined droughts frequency. We used following indices: SPI (Standardized Precipitation Index), PNI (Percent of Normal Index), DI (Deciles index), MCZI (Modified CZI) and ZSI (Z-score Index), which take into account the values and distribution of daily precipitation amounts. The secondary aim of the work was to analyze and statistically confirm the relationship between daily EDI (Effective Drought Index) and moisture content of the top soil of the research site, measured in daily interval, i.e. to confirm the possibility of using EDI to signal the soil drought risk.

The monthly values of 5 meteorological indices (SPI,

PNI, DI, MCZI and ZSI) were calculated. Computed indices were used to evaluate the occurrence and extent of drought in the monitored time period. According to the analysis of obtained results, the driest years during the monitored period were years in the following order: 2018 and 2017, 2015, 2012 and 2006. High values of correlation coefficient (from 0.9301 to 0.9962) confirm strong correlation rate among all reviewed indices. Differences were only in the sensitivity of drought indices, i. e. in the number of months evaluated as severely or extremely dry.

Deficit or surplus of water resources in daily step was evaluated by the concept of "effective precipitation". According to the EDI index, dry periods prevailed during the year 2018, 2017 and 2015. The end of 2006 and the start of 2010 and 2011 can also be assessed as very dry. Daily value of EDI index provides a more detailed view of drought development than monthly indices. The correlation coefficients between EDI and the measured soil moisture values confirmed the possibility of using this index to signalize the soil drought risk.

The lowest values of the standardized water deficit index in the hydrological system were set for year 2018 (in particular the end of the year 2018) and this period was also the most extreme in terms of drought manifestations according to all used methodologies, when the computed values of indices were several times lower than normal values.

Ing. Peter Šurda, PhD.
Ing. Peter Rončák, PhD.
Ing. Justína Vitková, PhD.
Ústav hydrológie SAV
Dúbravská cesta 9
841 04 Bratislava
Tel.: +4212 3229 3520
E-mail: surda@uh.savba.sk
roncak@uh.savba.sk
vitkova@uh.savba.sk

Andrej Tárník
Katedra biometeorológie a hydrológie
Fakulta záhradníctva a krajinného inžinierstva SPU v Nitre
Hospodárska 7, Nitra
E-mail: andrej.tarnik@uniag.sk