

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Stavebná fakulta

Ing. Mária Ďurigová

Autoreferát dizertačnej práce

**DETEKCIA ZMIEN HYDROMETEOROLOGICKÝCH
ČASOVÝCH RADOV NA SLOVENSKU
V PODMIENKACH KLIMATICKEJ ZMENY**

na získanie akademického titulu philosophiae doctor - PhD.

v doktorandskom študijnom programe: vodohospodárske inžinierstvo

Miesto a dátum: Bratislava, 31. máj 2020

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre vodného hospodárstva krajiny, Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Mária Ďurigová

Katedra vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: Prof. Ing. Kamila Hlavčová, PhD.

Katedra vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Oponenti: prof. Ing. Jaroslav Škvarenina, CSc.

LF TU Zvolen

RNDr. Pavla Pekárová, DrSc.

ÚH SAV Bratislava

Ing. Zuzana Danáčová, PhD.

SHMÚ Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný 29. júla 2020.

Obhajoba dizertačnej práce sa koná 14. augusta o 11:00 hod. na Katedre vodného hospodárstva krajiny, Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

.....

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

Dekan Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Obsah

Úvod	4
Ciele dizertačnej práce	4
Metodika.....	5
Detekcia bodu zlomu.....	5
Pettittov test	6
Buishandov poradový test.....	6
Analýza rezíduí	7
Analýza vzťahu odchýlok.....	8
Mann-Kendall test.....	11
Výsledky.....	12
Opis územia.....	13
Detekcia bodov zlomu.....	15
Analýza vzťahu odchýlok	17
Trendová analýza	19
Analýza dekád.....	20
Záver.....	22
Literatúra	23
Zoznam publikácii autora	25

Úvod

Zmeny v hydrologickom režime a odtokových procesov spôsobené zmenou klímy a zmenami vo využívaní krajiny predstavujú v súčasnosti jeden z hlavných zdrojov neistoty v oblasti hospodárenia s vodou. Tieto zmeny sa môžu prejavíť poklesom výdatnosti vodných zdrojov, zmenou režimu odtoku, zvýšením extrémnych povodní a sucha, prípadne zmenou zásob snehu v povodiach. Detekcia zmien v hydrologických prvkoch vzhľadom na zmeny hydrologického režimu je problematika, ktorou sa zaoberajú vedci po celom svete. Mnohé štúdie predpokladajú zmeny v sezonalite odtoku v tokoch najmä tam, kde zimné zrážky padajú vo forme snehu v dôsledku otepľovania (Barnett a kol., 2005; Hlavčová a kol., 2008; Szolgay a kol., 2004, 2007; Škvarenina, a kol., 2010).

Cieľom tejto práce je ponúknuť všeobecný prehľad problematiky zmien v hydrologickom režime spôsobené zmenou klímy a ďalšími faktormi. Taktiež popis a použitie metodických postupov identifikácie zmien v časových radoch, presnejšie identifikovanie bodov zlomu, trendov, a iných metód pre vybrané vodomerné stanice nachádzajúce sa na území Slovenska.

Ciele dizertačnej práce

Práca je zameraná na niekoľko metód skúmajúce body zlomu, zmeny v odtokovom režime, trendy a analýzu dekád.

Na identifikovanie náhlych zmien v časových radoch, teda body zlomu boli použité viaceré metódy. Na detekciu bodu zlomu boli použité tri metódy, z toho dve štatistické testy - Pettittov test a Buishandov test, a jedna exploratívna metóda - analýza rezíduí.

Zmeny v odtokovom režime boli skúmané analýzou vzťahu odchýlok, ktorá skúma veľkosť zmien vo vodnosti skúmaného mesiaca vzhľadom k roku. Skúmané mesiace boli rozdelené na dve obdobia pomocou vyššie použitej metóde analýzy rezíduí a na dve 25-ročné obdobia. Táto metóda patrí k hydrologickým exploratívnym metódam.

Ďalej bola vykonaná trendová analýza pomocou neparametrického Mann-Kendalovho testu. Tento štatistický test je často používaným v analýze hydrometeorologických časových radoch.

Všetky vyššie spomenuté štatistické testy boli vyhodnocované s hladinou významnosti 0,1. Všetky metódy boli aplikované na celý súbor priemerných mesačných prietokov 58-ich staníc v rámci Slovenska. Taktiež výsledky metód boli priestorovo interpretované.

Potom bola vykonaná analýza dekád, kde okrem prietokov boli hodnotené teplota vzduchu a úhrny zrážok pre stanice nachádzajúce sa v hornom úseku povodia Váhu. V tomto prípade bolo vyhodnocovaných päť dekád. Spoločné hodnotenie troch hydrometeorologických prvkov slúži na pozorovanie ich vzájomného vplyvu.

Napokon bola vykonaná trendová analýza simulovaných prietokov v rámci povodia Váhu po vodomernú stanicu v Liptovskom Mikuláši a povodia Hronu po Banskú Bystricu. Simulované prietoky pochádzajúce z KNMI scenára sú namodelované do roku 2100. V našom prípade sme pristúpili k trendovej analýze viacerých časových úsekov.

Metodika

V metodike uvádzame vysvetlenie metód použitých na detekciu bodu zlomu, analýzu vzťahu odchýlok a trendovú analýzu.

Detekcia bodu zlomu

Testy slúžiace na detekciu bodu zlomu umožňujú zistenie homogenity v čase alebo identifikovanie náhlych zmien. Je to široko používaný nástroj na zisťovanie zmien v hydrologických procesoch. Medzi metódy na detekciu bodu zlomu v hydrometeorologických dátach patria napr. štandardný normálne-rozdelený test, Wilcoxonov neparametrický test, dvojfázové regresné postupy, test nehomogenity a postupy informačných kritérií a ich variácie (Reeves a kol., 2007). V tejto práci boli body zlomu detegované pomocou Pettittovho testu, Buishandovho testu a pomocou analýzy rezíduí.

Pettittov test

Na zistenie jedného bodu zlomu, resp. bodu zmeny v hydrologických súboroch dát sa často používa Pettittov test. Patrí do skupiny neparametrických testov homogenity. Testuje sa nulová hypotéza, ktorá predpokladá, že premenné sa riadia jednou alebo viacerými rozdeleniami, ktoré majú rovnaký parameter lokalizácie, oproti alternatívnej hypotéze, že v súbore dát existuje bod zlomu, resp. bod zmeny (Pohlert, 2018). Pettittov je definovaný ako:

$$\hat{U} = \max |U_k|, \quad (1)$$

kde U_k je dané ako:

$$U_k = 2 \sum_{i=1}^k r_i - k(n+1), \quad (2)$$

kde $k=1,2,\dots,n$, and r_i sú rady pozorovaní X_i . Najpravdepodobnejší bod zmeny sa nachádza tam, kde $\hat{U}$ dosahuje svoju maximálnu hodnotu (Pettitt, 1979).

Buishandov poradový test

Buishandov poradový test je určený pre dáta, ktoré nie sú normálne rozdelené. Nech X znamená náhodnú normálnu premennú, potom sa môže navrhnuť nasledujúci model s jedným bodom zlomu:

$$X_i = \begin{cases} \mu + \epsilon_i, & i = 1, \dots, m \\ \mu + \Delta + \epsilon_i & i = 1 + m, \dots, n \end{cases}, \quad (3)$$

kde $\epsilon \approx N(0, \sigma)$. Nulová hypotéza $\Delta = 0$ je testovaná proti alternatívnej hypotéze $\Delta \neq 0$ (Pohlert, 2018). V Buishandovom teste sa upravené čiastkové súčty upravené podľa stupnice vypočítajú ako:

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \hat{x}) \quad (1 \leq k \leq n). \quad (4)$$

Štatistický test je vypočítaný ako:

$$Rb = \frac{\max S_k - \min S_k}{\sigma}. \quad (5)$$

P-hodnota je odhadnutá pomocou Monte Carlo simulácie použitím replikátov m (Pohlert, 2018).

Analýza rezíduí

Metóda identifikácie bodu zlomu pomocou rezíduí používa výpočet rozdielu priemerných mesačných prietokov a dlhodobých priemerných mesačných prietokov pre jednotlivé mesiace a pre jednotlivé stanice (Vzorec 6). Rezíduá sa následne kumulatívne sčítavali a vyniesli do grafu (Obr. 1), kde absolútna maximálna hodnota predstavovala bod zlomu s prislúchajúcim rokom (Obr. 2).

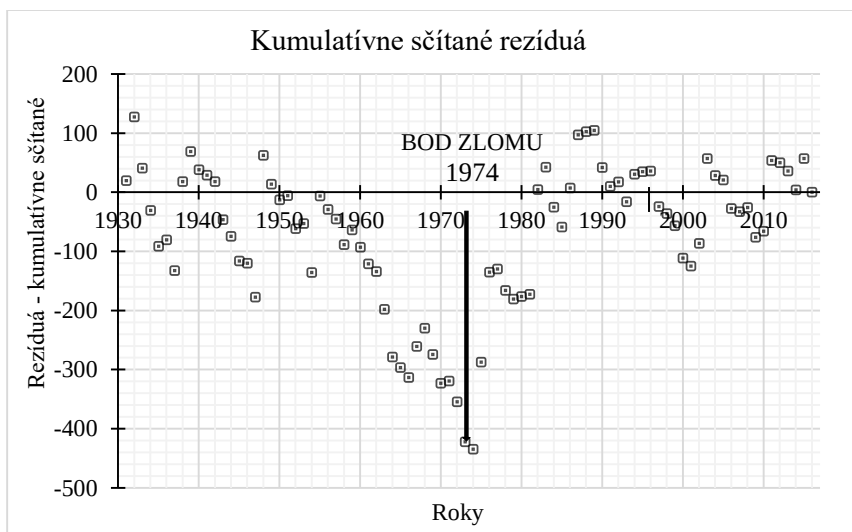
$$r = Q_i - \bar{Q}_i, \quad (6)$$

kde:

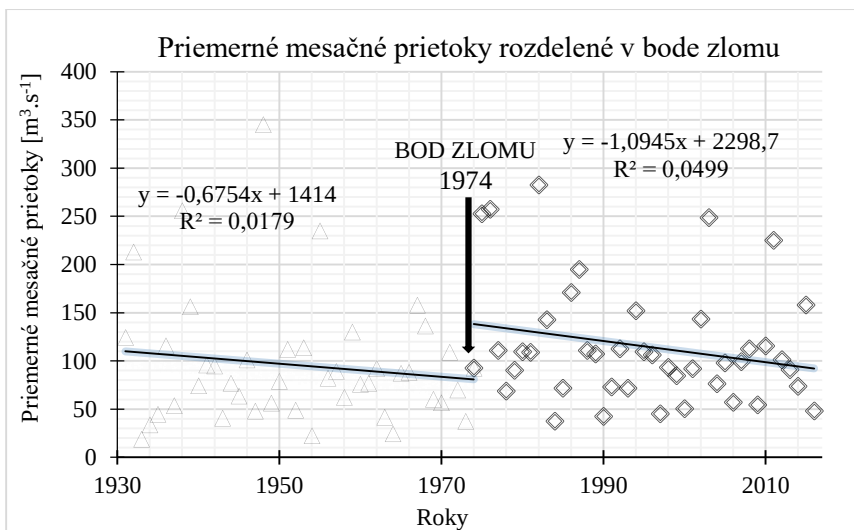
r – rezíduum,

Q_i – priemerný mesačný prietok v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,

$\bar{Q}_i$ – priemerný dlhodobý mesačný prietok v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Obrázok 1: Ukážka detekcie bodu zlomu pomocou rezíduí



Obrázok 2: Ukážka priemerných mesačných prietokov s detegovaným bodom zlomu v konkrétnom roku

Analýza vzťahu odchýlok

Analýza vzťahu odchýlok sa zaoberá sledovaním závislosti vodnosti konkrétného mesiaca vzhľadom na vodnosť daného roku a zároveň porovnaním konkrétného časového radu rozdeleného na dva obdobia. Táto metóda zahŕňa výpočet odchýlok priemerných ročných prietokov od dlhodobého ročného prietoku a odchýlok priemerných mesačných prietokov od dlhodobého priemerného mesačného prietoku. Následne sa zisťuje závislosť týchto odchýlok pre celkové obdobie pozorovania, ktoré je rozdelené na dva časové úseky. Samotné ročné a mesačné odchýlky sú vypočítané podľa nasledujúcich vzorcov:

$$\Delta_1 = \frac{Q_i - \bar{Q}_i}{\bar{Q}_i} * 100, \quad (7)$$

$$\Delta_2 = \frac{Q_j - \bar{Q}_j}{\bar{Q}_j} * 100, \quad (8)$$

kde:

Δ_1 - odchýlky priemerných ročných prietokov od dlhodobého ročného prietoku v %,

Q_i - priemerný ročný prietok pre každý i rok v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,

$\bar{Q}_i$ - dlhodobý priemerný ročný prietok $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,

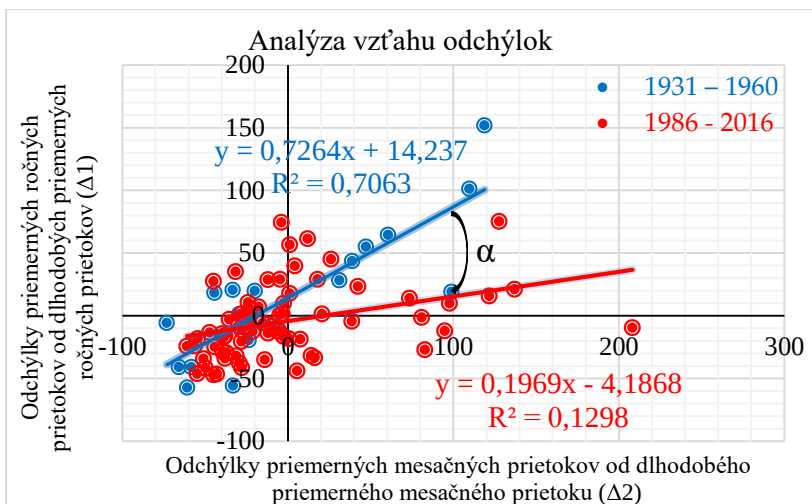
Δ_2 - odchýlky priemerných mesačných prietokov od dlhodobého priemerného mesačného prietoku v %,

Q_j - priemerný mesačný prietok v j mesiaci v danom i roku v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,

$\bar{Q}_j$ - dlhodobý priemerný mesačný prietok za j mesiac v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Kvôli identifikácii zmeny vo vodnosti sa rozdelí sledované obdobie na dve obdobia, kde sa zisťuje lineárna závislosť medzi odchýlkami Δ_1 a Δ_2 , vyhodnocuje sa uhol α , ktorý vzniká medzi lineárnymi priamkami. Obr. 3 znázorňuje grafické riešenie tejto metódy. Na y-ovej osy sú vykreslené ročné odchýlky Δ_1 a na x-ovej osy sú vykreslené mesačné odchýlky Δ_2 . Spomínané rozdelenie na dve obdobia je znázornené na Obr. 3 ako prvé obdobie vyznačené modrou farbou a druhé obdobie znázornené červenou farbou. Lineárne závislosti sú obdobne vykreslené. Uhol medzi lineárnymi závislosťami predstavuje uhol α , ktorý znázorňuje konečný hodnotiaci parameter tejto metódy.

Samotný uhol α medzi lineárnymi závislosťami, ktorý zvierajú dve zvolené obdobia sa vypočíta pomocou známych smerníc priamok. Rozdiel arctangensov daných smerníc predstavuje veľkosť uhla α . Výpočet uhlu α z ukážky metódy na Obr. 3, by mal tvar $\alpha = \arctang(0,7264) - \arctang(0,1969)$.



Obrázok 3: Ukážka analýzy vzťahu odchýlok

Tegelhoffová (2013) uvádza, že uhol α , ktorého veľkosť je menšia ako interval $(10^\circ, -10^\circ)$ indikuje nevýraznú zmenu vo vodnosti. Ak sa uhol α pohybuje v rozmedzí od $(10^\circ, -10^\circ)$ do $(20^\circ, -20^\circ)$, ide o strednú zmenu vodnosti a ak je uhol α väčší ako $(20^\circ, -20^\circ)$ ide o výraznú zmenu vo vodnosti (Tab. 1). Táto metóda by teda mala identifikovať medzi dvoma rozdelenými časovými radmi zmenu vo vodnosti.

Tabuľka 1: Hodnotenie vodnosti pomocou analýzy vzťahu odchýlok

Hodnotenie	Uhol α
Nevýrazná zmena vodnosti	Pod $(10^\circ, -10^\circ)$
Stredná zmena vodnosti	Od $(10^\circ, -10^\circ)$ do $(20^\circ, -20^\circ)$
Výrazná zmena vodnosti	Nad $(20^\circ, -20^\circ)$

Spomínané rozdelenie sledovaného obdobia na dve časové úseky bolo v Tegelhoffová (2013) vyselektované ako prvých 20 rokov a posledných 20 rokov. Pri časových radoch kde bolo možné dosiahnuť neprekrývanie boli použité 30-ročné obdobia. V prípade

tejto práce sme sa rozhodli použiť dva prístupy k rozdeleniu sledovaného obdobia a to nasledovne:

- Rozdelenie na dve 25-ročné obdobia. Prvé obdobie je od 1961 do 1980 a druhé obdobie je od 1998 do 2017.
- Rozdelenie v roku bodu zlomu, ktorý bol identifikovaný pomocou analýzy rezíduí v každej stanici a mesiaci osobitne.

Cieľom použitia viacerých prístupov je hodnotenie rozdielov medzi nimi. Prepojením analýzy vzťahu odchýlok a rozdelenia obdobia pomocou bodu zlomu vzniká možnosť pozorovanie kvantifikácie samotného bodu zlomu v časovom rade. Očakávaným výsledkom by mohol byť, že rozdelenie obdobia pomocou bodu zlomu identifikuje väčšie uhly medzi lineárnymi priamkami odchýlok ako rozdelenie pomocou ostatných prístupov.

Mann-Kendall test

Neparametrický Mann-Kendall test sa používa na detekciu monotónnych trendov najčastejšie v environmentálnych, klimatických alebo hydrologických údajoch. Nulová hypotéza predpokladá, že dáta pochádzajú zo nezávislého súboru dát a sú rovnako distribuované. Alternatívna hypotéza spočíva v tvrdení, že údaje pochádzajú z monotónneho trendu (Pohlert, 2018).

Pre zisťovanie trendov v radoch hydrologických dát je dôležité si uvedomiť, že ich rozdelenie môže byť vzdialené od normálneho rozdelenia (Kendall, 1975). Pre časovo zoradené dáta $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ sa používa vzťah:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k), \quad (8)$$

d'alej platí:

$$\text{Sign}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1, & x_j - x_k > 0 \\ 0, & x_j - x_k = 0 \\ -1, & x_j - x_k < 0 \end{cases}, \quad (9)$$

de *sign* – predstavuje znamienko, resp. znamienkovú metódu. Ak pre časové rady platí, že $n \geq 8$, tak testovacie štatistiky S nadobúdajú približne normálne rozdelenie a ich variancia je daná vzťahom:

$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[\sum_{p=1}^g n(n-1)(2n+5) - t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right], \quad (10)$$

kde:

g – počet viazaných skupín (dátová skupina s rovnakou hodnotou),
 t_p – počet čísel s rovnakou hodnotou v skupine $p=1 \dots g$.

Trend a jeho štatistická významnosť sa hodnotí pomocou charakteristiky Z . Táto má normálne rozdelenie a určuje ju nasledujúci vzťah:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{pre } S > 0 \\ 0 & \text{pre } S = 0. \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{pre } S < 0 \end{cases} \quad (11)$$

Orientáciu trendu udáva znamienko charakteristiky Z . Ak $Z > 0$, ide o rastúci trend, ak $Z < 0$, znamená to klesajúci trend. Ak je charakteristika Z rovná 0, tak v dátach neexistuje trend. P-hodnotu, teda hodnotu pravdepodobnosti výskytu je možné získať pomocou vzťahu:

$$p = 0,5 - \varphi(|Z|) \text{ kde } \varphi(|Z|) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{|Z|} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (12)$$

Výsledky

V práci bolo vybraných 58 staníc z celého Slovenska. Časové rady údajov tvoria priemerné mesačné prietoky. Výsledky analýz boli vypočítané a interpretované vo forme hydrologického roku, teda od začiatku novembra predošlého roka po október daného roka. Testy

a analýzy boli vykonané pre priemerné mesačné prietoky ako časové rady:

- pre jednotlivé mesiace,
- pre sezóny:
 - zimný priemer mesačných prietokov od novembra po apríl (Q_{zima}),
 - letný priemer mesačných prietokov od mája po október (Q_{leto}),
- pre priemerné ročné prietoky (Q_r).

Na časové rady údajov boli aplikované nasledujúce testy a analýzy:

- detekcia bodov zlomu pomocou nasledujúcich testov:
 - Pettittov test,
 - Buishandov test,
 - analýza rezíduí,
- analýza vzťahu odchýlok použitím dvoch alternatív,
- trendová analýza pomocou Mann-Kendallovho testu pozorovaných a simulovaných časových radov,
- analýza dekád prietokov, teploty vzduchu a zrážok pre povodia nachádzajúce sa na hornom úseku Váhu.

Opis územia

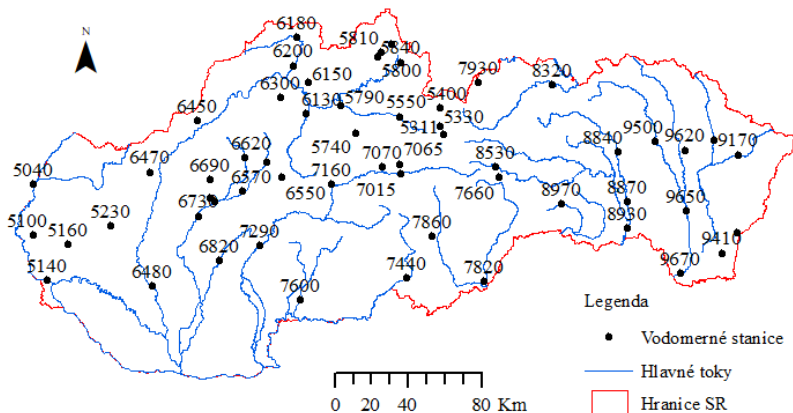
Územie Slovenska patrí z hľadiska globálnej klimateckej klasifikácie do severného mierneho klimatického pásma s pravidelným striedaním štyroch ročných období a premenlivým počasím, s relatívne rovnomerným rozložením zrážok počas roka. Podnebie je ovplyvňované prevládajúcim západným prúdením vzduchu v miernych šírkach medzi stálymi tlakovými útvarmi, Azorskou tlakovou výšou a Islandskou tlakovou nížou. Podnebie konkrétneho územia ovplyvňujú i mikroklimatické faktory, najmä tvar a orientácia reliéfu voči svetovým stranám a prevládajúcemu

prúdeniu, potom je to relatívna výšková členitosť, vegetácia a antropogénne vplyvy.

Teplota vzduchu patrí medzi hlavné klimatické činitele, ktoré určujú klimatický ráz jednotlivých oblastí. Najteplejšou oblasťou na Slovensku je Podunajská nížina s ročným priemerom 9 až 11°C. O niečo nižšiu teplotu má Východoslovenská nížina. Oblasti dolín a kotlín nadväzujúce na nížiny, ako napr. Považie, Ponitrie, Pohronie dosahujú priemernú ročnú teplotu vzduchu 6 až 8°C. Vyššie položené doliny a kotliny dosahujú priemernú ročnú teplotu do 6°C. Priemerné ročné teploty pre oblasti nachádzajúce sa v nadmorskej výške okolo 1000 m n. m. sú v rozmedzí 4 až 5°C, pre nadmorskú výšku okolo 2000 m n. m. je to -1°C.

Atmosférické zrážky sa považujú spolu s teplotou vzduchu za najvýznamnejší meteorologický prvok. Je to najpremenlivejší meteorologický prvok z priestorového aj časového hľadiska. Priemerný ročný úhrn zrážok sa pohybuje od 500 mm v oblasti Galanty a Žitného ostrova až do 2000 mm v oblasti Vysokých Tatier. V priebehu roka pripadá na letné obdobie jún až august približne 40 % zrážok, na jar 25 %, na jeseň 20 % a na zimu 15 % zrážok [1].

Pre potreby tejto práce bolo vybraných 58 slovenských vodomerných staníc (Obr. 4). Celkový počet vodomerných staníc na Slovensku v rámci štátnej hydrologickej siete je 418. Vodomerné stanice v sú väčšinou bez významného ovplyvnenia odbermi, manipuláciou na vodných nádržiach a prevodmi vody. Tieto vodomerné stanice boli vybrané aj na základe práce Danáčová a kol., 2015, kde pracovali s týmito vodomernými stanicami v rámci skúmania hydrologických extrémov. V súbore vodomerných staníc sú napríklad stanice Bratislava – Dunaj – 5140 a Šaľa – Váh – 6480, ktoré sú ovplyvnené, ale do výpočtov boli zaradené kvôli dlhému radu pozorovaní a kvôli získaniu dostatočného pokrytia západnej časti Slovenska. Pozorované rady údajov nám poskytol Slovenský hydrometeorologický ústav.

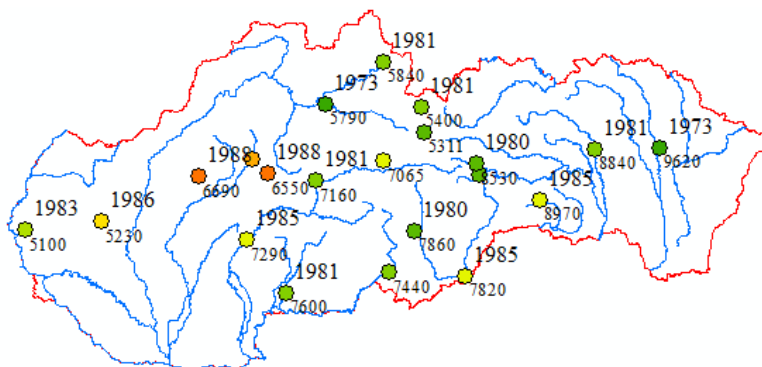


Obrázok 4: Mapa Slovenskej republiky s hlavnými tokmi a vodomernými stanicami použité v tejto práci

Vodomerne stanice s prislúchajúcou plochou povodia sú rôzne veľké a v rôznej nadmorskej výške. Cieľom tohto výberu bolo najrovnomernejšie pokrytie celého Slovenska a výber čo najväčšieho počtu staníc, ktoré sú neovplyvnené alebo málo ovplyvnené.

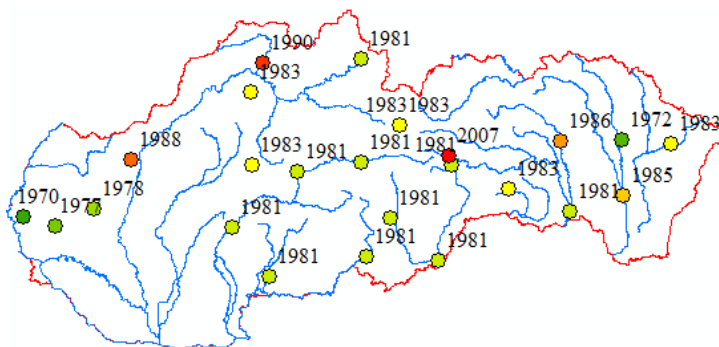
Detekcia bodov zlomu

Pettittov test ako prvý štatistický test použitý na detekciu bodov zlomu v tejto práci identifikoval 123 štatisticky významných bodov zlomu z 870-ich skúmaných časových radov. Najviac ich bolo zistených v roku 1981, čo predstavuje 12,2 % podiel. Najviac bodov zlomu bolo zistených v priemerných ročných prietokoch, a to 21 bodov zlomu, čo je 17,1 % (Obr. 5). Najviac bodov zlomu z pohľadu dekád sa nachádza vo 80. rokoch so 79 bodmi zlomu čo predstavuje podiel 64,2 %. Z celkového počtu 58-ich staníc bol zistený aspoň jeden bod zlomu v 38-ich staniaciach. Z pohľadu jednotlivých vodomerných staníc sa najviac bodov zlomu vyskytlo v stanici Láb – Močiarka - 5100, kde bolo detegovaných 10 bodov zlomu.



Obrázok 01: Body zlomu vypočítané pomocou Pettittovho testu pre priemerné ročné prietoky (Q_r)

Buishandov test identifikoval nižší počet štatisticky významných bodov zlomu, a to 84 na 90 % hladine významnosti. Z pohľadu jednotlivých rokov, najviac bodov zlomu bolo zistených v roku 1983, presnejšie 14 bodov zlomu, čo predstavuje 16,7 %. Najviac bodov zlomu detegovaných v priemerných sezónnych prietokoch zimného obdobia a to 25 bodov zlomu (29,8 %, Obr. 6). Naopak, v mesiacoch jún a október neboli zistené žiadne body zlomu. Z pohľadu dekád sa opäť najviac bodov zlomu nachádza v 80. rokoch a to 47 bodov zlomu, čo predstavuje podiel 56 %. V 33 vodomerných staniciach sa nachádzal aspoň jeden bod zlomu. Najviac bodov zlomu bolo zistených v stanici Stratená – Hnilec - 8530, so 6 bodmi zlomu.



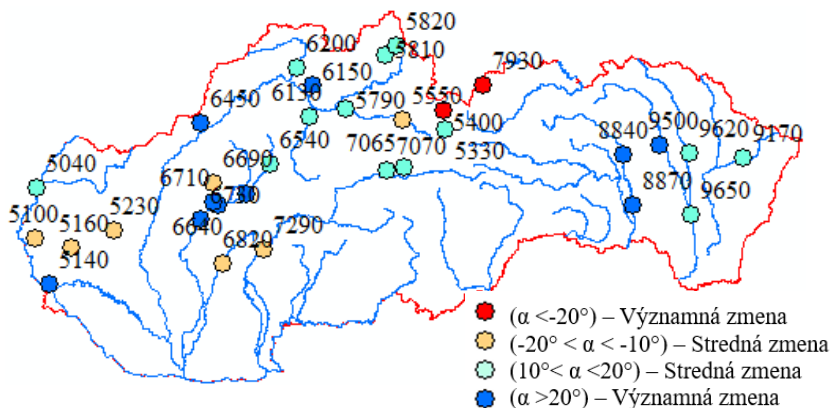
Obrázok 6: Body zlomu vypočítané pomocou Buishandovho testu pre priemerné sezónne prietoky zimného obdobia (Q_{zima})

Analýza rezíduí na rozdiel od predchádzajúcich testov identifikoval bod zlomu v každom časovom rade použitých stanic. Výsledky analýzy rezíduí sú bez štatistickej významnosti. Celkovo najviac bodov zlomu bolo identifikovaných v roku 1983 (spolu 62 bodov zlomu celkového počtu bodov zlomu 870, čo predstavuje 7,13 %). Najviac sa ich nachádzalo v priemerných zimných prietokoch, a to 23 bodov zlomu. 80. roky predstavujú obdobie, v ktorom sa najčastejšie objavujú body zlomu (341 bodov zlomu z 870, teda 39,2 % z celkového počtu).

Vo všeobecnosti teda všetky tri metódy poukazujú na najpočetnejší výskyt bodov zlom v 80. rokoch, presnejšie v ich prvej polovici.

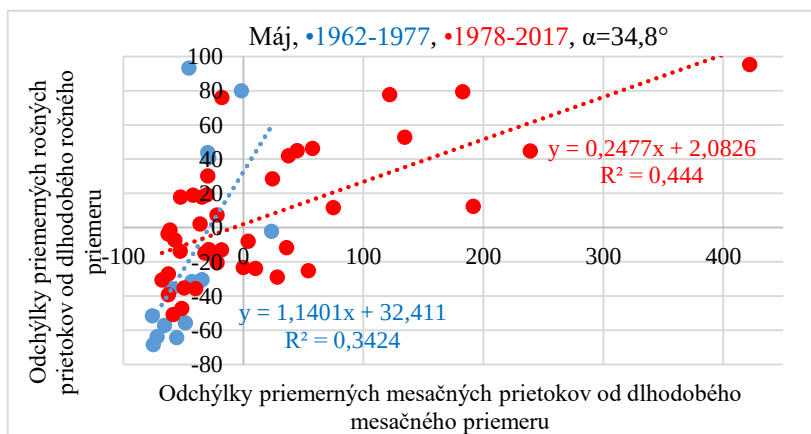
Analýza vzťahu odchýlok

Analýza vzťahu odchýlok využitím analýzy rezíduí identifikovala celkový počet významných a stredných zmien vo vodnosti je 206. Z tohto 164 uhlov predstavuje strednú zmenu vo vodnosti a 42 uhlov predstavuje výraznú zmenu vo vodnosti. Všeobecne je možné konštatovať, že zmeny v odtokovom režime majú vo väčšej miere stredne významný charakter. Najviac zmien v odtokovom režime bolo detegovaných v januári, kde sa našlo 32 uhlov (Obr. 7).



Obrázok 7: Analýza vzťahu odchýlok pre január

Najmenej uhlov bolo nájdených v marci, kde sa našlo 9 uhlov. V rámci pozorovania zmien v staniciach, najviac zmien v odtokovom režime je možné vidieť v stanici Jasenovce – Oľka - 9620, kde došlo v 10 mesiacoch ku zmene. Bod zlomu v tejto stanici sa zväčša nachádza v 70. rokoch, podľa analýzy rezíduí (Obr. 8).



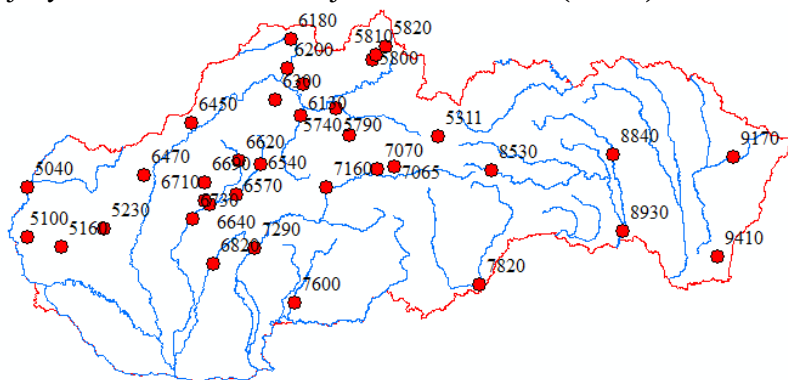
Obrázok 8: Analýza vzťahu odchýlok pre mesiac máj s uhlom $\alpha=34,8^\circ$, ktorý predstavuje výraznú zmenu vodnosti v danom mesiaci v stanici Jasenovce.

Analýza vzťahu odchýlok využitím rozdelenia na 25-ročné obdobia identifikovala 127 uhlov so strednou alebo výraznou zmenou vodnosti. Je to výrazne nižší počet ako v prípade prvej alternatívy. Stredná zmena vo vodnosti bola identifikovaná v 118-ich uhloch. Iba 9 uhlov vykazuje výraznú zmenu vo vodnosti. Najviac uhlov so strednou a výraznou zmenou vodnosti bolo identifikovaných v novembri, máji a auguste zhodne po 17 uhlov. Najmenej uhlov sa nachádza v apríli, a to 4 uhly. Z pohľadu jednotlivých staníc sa najviac uhlov nachádza v staniciach Biskupice – Bebrava - 6690 a Dolná Lehota - Vajskovský potok – 7070. V 48-ich staniciach boli zistený aspoň jeden uhol predstavujúci strednú alebo výraznú zmenu. V 10-ich staniciach nebol zistený ani jeden takýto uhol.

Analýza vzťahu odchýlok využitím analýzy reziduí sa javí ako efektívnejšia alternatíva pri detekcii uhlov indikujúcich zmeny v odtokovom režime.

Trendová analýza

Celkový počet zistených trendov bol 203, so štatistickou významnosťou 0,1. Z toho bolo identifikovaných 178 klesajúcich trendov a 25 rastúcich trendov. Najviac trendov bolo identifikovaných v jún a to 36 trendov s klesajúcim charakterom (Obr. 9).



Obrázok 9: Štatisticky významné trendy - Jún

Najmenej trendov bolo identifikovaných v septembri a to 5 klesajúcich trendov. V porovnaní mesiacov zimného a letného

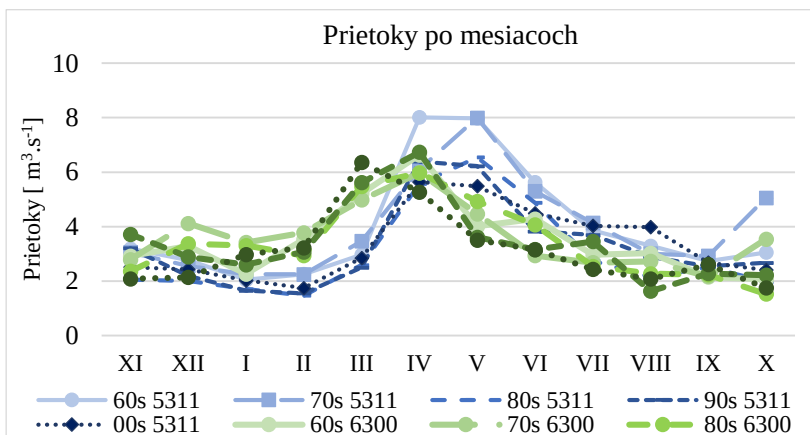
obdobia sa zistil celkový súčet štatisticky významných trendov pre zimné mesiace 67 trendov (z toho 47 klesajúcich a 20 rastúcich). V mesiacoch od mája po október, teda v letnej sezóne sa nachádzalo 83 trendov (z toho 79 klesajúcich a 4 rastúce). Teda v súčte trendov zimných mesiacov bolo identifikovaných menej trendov ako v letných mesiacoch. Hodnotenie trendov po jednotlivých staniaciach poukázalo, že okrem 3 staníc (5140, 5550 a 6480) bol zistený aspoň jeden štatisticky významný trend v každej stanici. Maximálny počet trendov bol identifikovaný v stanici Bohdanovce – Trnávka - 5230, kde bolo zistených 12 trendov. Rastúce trendy boli identifikované iba v dvoch staniaciach a to v stanici Východná - Biely Váh – 5330) a v stanici Jasenovce – Olka – 9620). V rámci celého sledovaného obdobia bolo detegované značné množstvo štatisticky významných klesajúcich trendov na západnom Slovensku. V časti stredného a východného Slovenska bolo väčšie množstvo staníc bez štatisticky významných trendov.

Trendová analýza simulovaných prietokov Váhu a Hrona identifikovala 12 rastúcich a 6 klesajúcich trendov v rámci troch sledovaných období. V prvom období 1981-2010 neboli zistené žiadne trendy. V druhom období boli zistené iba štatisticky významné rastúce trendy v zimnom období. V treťom období 2056-2100 sa obdobne objavujú štatisticky rastúce trendy v zimnom období v oboch staniaciach. V tomto poslednom období sa vyskytujú aj štatisticky významné klesajúce trendy, ktoré sa týkajú hlavne prietokov letných mesiacov a letnej sezóny. Teda rastúce trendy sa nachádzajú výlučne v zimných mesiacoch a zimnej sezóne a klesajúce trendy sa nachádzajú výlučne v letných mesiacoch a letnej sezóne.

Analýza dekád

Výsledky hodnotenia povodí na hornom úseku Váhu poukazujú na najnižšie prietoky v 80. rokoch a najvyššie v 00. rokoch. V porovnaní prietokov zimnej a letnej sezóny majú stanice nachádzajúce sa najvýchodnejšie vyššie prietoky v letnej sezóne a ostatné stanice majú vyššie prietoky v zimnej sezóne. Tento jav je spôsobený zrejme rozdielnymi maximami v rámci zimných a letných

mesiacoch. Buď sa maximá objavujú v apríly, ktorý spadá do zimnej sezóny, alebo sa maximá objavujú viac v máji, ktorý spadá do letnej sezóny (Obr. 10).



Obrázok 10: Porovnanie priebehu prietokov po jednotlivých mesiacoch hydrologického roka v stanici Čierny Váh (modrá farba) a v stanici Poluvsie (zelená farba).

Výsledky analýzy dekád v rámci teploty vzduchu poukazuje na zjavný rastúci trend vo všetkých staniciach. Medzi najteplejšou a najchladnejšou dekádou je rozdiel v priemere v každej stanici 1,5°C. Teplota vzduchu má vo všetkých povodiach veľmi podobný priebeh. Najchladnejší mesiac je január a najteplejší je júl a august. Režim zrážok v prvých dekádach má premenlivý alebo klesajúci charakter. Od 80. bol v nich zaznamenaný mierny rast. 00. roky predstavuje dekádu najbohatšiu na zrážky. Najmenej zrážok spadlo v 80. rokoch. Rozdiel medzi 00. rokmi a 80. rokmi v zimnej sezóne je v priemere 5,4 mm/mesiac pre všetky stanice. V letnej sezóne je to až 16,5 mm/mesiac. Vplyv rastu zrážok v posledných dekádach sa prejavil v niektorých staniciach miernym rastom prietokov. Napriek tomu v niektorých staniciach prietok klesal. Tento znižujúci sa prietok je zrejme spôsobený zvýšeným výparom v dôsledku zvyšovania teploty.

Záver

Všetky tri metódy na detekciu bodu zlomu poukazujú na najpočetnejší výskyt bodov zlomu v 80. rokoch, presnejšie v ich prvej polovici. To môže byť spôsobené znížením úhrnu zrážok a zvýšením teploty vzduchu v období od roku 1981 až po rok 1992. Pettittov a Buishandov test by sme mohli považovať za presnejšie testy, vďaka štatistickej významnosti, v porovnaní s analýzou odchýlok.

Analýza vzťahu odchýlok využitím analýzy rezíduí sa javí ako efektívnejšia alternatíva pri detekcii uhlov indikujúcich zmeny v odtokovom režime, kvôli identifikovaniu väčšie počtu stredných a výrazných zmien vo vodnosti.

Trendová analýza identifikovala 203 trendov v 58-ich skúmaných staniach, so štatistickou významnosťou 0,1. Z toho bolo identifikovaných 178 klesajúcich trendov a 25 rastúcich trendov. V rámci celého sledovaného obdobia bolo detegované značné množstvo štatisticky významných klesajúcich trendov na západnom Slovensku. V časti stredného a východného Slovenska bolo väčšie množstvo staníc bez štatisticky významných trendov.

Výsledky analýzy dekád, ktorá hodnotila povodia na hornom úseku Váhu poukazujú na najnižšie prietoky v 80. rokoch a najvyššie v rokoch 2001-2010. Medzi najteplejšou a najchladnejšou dekádou je rozdiel v priemere v každej stanici 1,5°C. Režim zrážok v prvých dekádach má premenlivý alebo klesajúci charakter. Od 80. rokov bol v nich zaznamenaný mierny rast. Obdobie 2001-2010 predstavuje dekádu najbohatšiu na zrážky. Vplyv rastu zrážok v posledných dekádach sa prejavil v niektorých povodiach miernym rastom prietokov. Napriek tomu v niektorých povodiach prietok klesal. Tento znižujúci sa prietok je zrejme spôsobený zvýšeným výparom v dôsledku zvyšovania sa teploty vzduchu.

Výsledky jednotlivých analýz poukazujú na určitú zmenu v režime priemerných mesačných prietokov, ale pre potvrdenie ich správnosti je potrebné preskúmať ďalšie hydrologické a meteorologické prvky a použiť ďalšie metódy na identifikáciu zmien. Budúcnosť detekcie zmien v hydrometeorologických radoch je

možné zamerať na vývoj nových postupov a metód, ako napr. návrh nových koncepcných zrážkovo-odtokových modelov pre scenáre zmeny klímy. Výstupy môžu poskytnúť nový obraz o prebiehajúcich zmenách režimu a podklad pre adaptáciu v hospodárení s vodou a zmiernenie extrémnych javov.

Vzhľadom na vývoj zmeny klímy sú adaptačné opatrenia nevyhnutnou súčasťou snahy znižovania emisie skleníkových plynov. Riešením, ktoré by teda malo zabrániť alebo aspoň minimalizovať riziká a negatívne dôsledky zmeny klímy, je kombinácia opatrení zameraných na znižovanie emisií skleníkových plynov s opatreniami, ktoré znížia zraniteľnosť a umožnia adaptáciu človeka a ekosystémov s nižšími ekonomickými, environmentálnymi a sociálnymi nákladmi. Cieľom je zníženie zraniteľnosti ekosystémov a zvýšenie adaptívnej schopnosti prírodných a antropogénnych systémov voči aktuálnym a očakávaným negatívnym dôsledkom zmeny klímy.

Literatúra

Barnett, T. – Adam, J. – Lettenmaier, D. 2005: Impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*. 438. 303-9. 10.1038/nature04141.

Hlavčová, K., Horvát, O., Szolgay, J., Danko, M., Kohnová, S. 2008: The effect of land use changes on runoff generation in the High Tatras region. In *Contributions to Geophysics and Geodesy*, ročník. 38, č.3, str. 305-326.

Szolgay, J. – Dzubák, M. – Hlavčová, K. – Kohnová, S. 2004: *Hydrológia, Odtokový proces a hydrológia povrchových vôd*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, 2004, str. 198, 63.

Szolgay, J. – Hlavčová, K. – Lapin, M. – Parajka, J. – Kohnová, S. 2007: *Vplyv zmeny klímy na odtokový režim na Slovensku*. Key Publishing, Ostrava. ISBN 978-80-87071-50-2.

Škvarenina, J. - Szolgay, J. - Šiška, B. - Lapin, M. (eds.) (2010): Klimatická zmena a krajina (dopady klimateckej zmeny a zhodnotenie zraniteľnosti územia na Slovensku v sektoroch „vodné hospodárstvo, lesy a poľnohospodárstvo“). Štúdia Slovenskej bioklimatologickej spoločnosti pri SAV, XXV, ročník: XXII.

Pohlert, T. 2018: Non-parametric trend tests and change-point detection. CC BY-ND 4.0.

Kendall, M.G. 1975: Rank Correlation Methods, Griffin, London.

Reeves, J. J. - Chen; X.L. - Wang, R. - Lund, R. - Lu, Q. Q. 2007: A Review and Comparison of Changepoint Detection Techniques for Climate Data. J. Appl. Meteor. Climatol., 46, 2007, str. 900–915, <https://doi.org/10.1175/JAM2493.1>.

Pettitt, A. N. 1979: A non-parametric approach to the change-point problem. J Appl Stat 28(2): str. 126 – 135.

Tegelhoffova, M. - Danáčová, M. - Szolgay, J. 2013: Priestorové hodnotenie ukazovateľa zmien hydrologického režimu, In ACTA HYDROLOGICA SLOVACA, ročník 14, č. 1, 2013, str. 243 – 251.

Danáčová, Z. – Blaškovičová, L. – Lovásová, E. – Poórová, J. – Šimor, V. – Škoda, P. 2015: Hydrologické extrémny: modelovanie a predpovedanie. In ACTA HYDROLOGICA SLOVACA. Ročník 16, Tematické číslo 1, 2015, 13-22.

Internetové zdroje:

[1] <http://www.shmu.sk/sk/?page=1064> [cit. 28. 06. 2019]

Zoznam publikácii autora

Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch

DANÁČOVÁ, M. - ĎURIGOVÁ, M. - MALIARIKOVÁ, M. - HLAVČOVÁ, K. Experimentálne merania vzniku povrchového odtoku pomocou simulátora dažďa v laboratórnych podmienkach. Acta hydrologica Slovaca, 17. s. 252--259.

ĎURIGOVÁ, M. - BALLOVÁ, D. - HLAVČOVÁ, K. Analyses of Monthly Discharges in Slovakia Using Hydrological Exploratory Methods and Statistical Methods. Slovak Journal of Civil Engineering, 27. s. 36--43.

ĎURIGOVÁ, M. - HLAVČOVÁ, K. - KOMORNÍKOVÁ, M. - KALICKÁ, J. - BALLOVÁ, D. - BACIGÁL, T. Analýza zmien priemerných mesačných prietokov na Slovensku v posledných desaťročiach. Acta hydrologica Slovaca, 20. s. 10--21.

ĎURIGOVÁ, M. - HLAVČOVÁ, K. The detection of changes in the upper Váh river basin according to a decadal analysis. Acta hydrologica Slovaca, [v tlači].

ĎURIGOVÁ, M. - HLAVČOVÁ, K. The detection of changes in a hydrological time series during recent decades. Slovak Journal of Civil Engineering, [v tlači].

Príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

ĎURIGOVÁ, M. - BALLOVÁ, D. - HLAVČOVÁ, K. Analyses of Monthly Discharges in Slovakia Using Hydrological Exploratory Methods. In Proceedings of 3rd International Electronic Conference on Water Sciences (ECWS-3). Basel: MDPI, 2019, ISSN 2504-3900.

Príspevky na domácich vedeckých konferenciách

ĎURIGOVÁ, M. Posúdenie potenciálnej tvorby povrchového odtoku na svahu pomocou simulátora dažďa. In 28. konferencia mladých

hydrológov, 15. konferencia mladých vodohospodárov, 17. konferencia mladých meteorológov a klimatológov. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav, 2016, ISBN 978-80-88907-94-7.

NÉMETOVÁ, Z. - ĎURIGOVÁ, M. - STUDVOVÁ, Z. Assessment of effect of land management on runoff generation on a slope. In Veda mladých 2017 - Science of Youth 2017. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, 2017, s. 86--97. ISBN 978-80-552-1688-1.

ĎURIGOVÁ, M. Detekcia zmien mesačných prietokov pre vybranú vodomernú stanicu. In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering. Bratislava: Spektrum STU, 2017, s. 536-542. ISBN 978-80-227-4751-6.

ĎURIGOVÁ, M. Detekcia zmien mesačných prietokov pomocou hydrologických exploratívnych metód. In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering. Bratislava: Spektrum STU, 2018, s. 442--448. ISBN 978-80-227-4864-3.

ĎURIGOVÁ, M. Detekcia bodov zlomu v priemerných mesačných prietokoch na Slovensku. In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering. Bratislava: Spektrum STU, 2019, s. 491-496. ISBN 978-80-227-4972-5.

Postery zo zahraničných konferencií

HLAVČOVÁ, K. - KOHNOVÁ, S. - VELÍSKOVÁ, Y. - STUDVOVÁ, Z. - SOČUVKA, V. - NÉMETOVÁ, Z. - ĎURIGOVÁ, M. Quantification of soil erosion and transport processes in the Myjava Hill Land. In Geophysical Research Abstracts. Volume 19/2017. Göttingen: Copernicus Publications, 2017.

ĎURIGOVÁ, M. - BALLOVÁ, D. Changes in time series of runoff in Slovakia in recent decades. In KALICZ, P. - HLAČOVÁ, K. - KOHNOVÁ, S. - RATTAYOVÁ, V. - GRIBOVSKI, Z.

Z. HydroCarpath 2018. Catchment Processes in Regional Hydrology: Field Experiments and Modelling in Carpathians Basins. Sopron: University of Sopron Press, 2018, s. 27. ISBN 978-963-334-199-5.

MARKOVÁ, R. - KOHNOVÁ, S. - ĎURIGOVÁ, M. - PARAJKA, J. Identification of changes in floods in Alpine-Carpathian European transect in the period of 1961-2010. In Geophysical Research Abstracts. Volume 21/2019. Göttingen: Copernicus Publications, 2019.

ĎURIGOVÁ, M. - BALLOVÁ, D. The detection of changes in mean monthly discharges in Slovakia. In KALICZ, P. - HLAVČOVÁ, K. - KOHNOVÁ, S. - RATTAYOVÁ, V. - GRIBOVSKI, Z. HydroCarpath 2019. Catchment Processes in Regional Hydrology: Coupling Field Experiments and Data Assimilation into Process Understanding and Modeling in Carpathian Basins. Sopron: University of Sopron Press, 2019, s. 23. ISBN 978-963-334-349-4.