

IDENTIFIKÁCIA FAKTOROV OVPLYVŇUJÚCICH ÚČINNOSŤ HYDROLOGICKÉHO MODELU POMOCOU ROZHODOVACÍCH STROMOV

Patrik Sleziak

Anotácia: Predložená práca sa zaoberá identifikáciou faktorov, ktoré majú vplyv na účinnosť koncepčného hydrologického modelu pomocou techniky rozhodovacích (regresných) stromov. Koncepčný zrážkovo-odtokový model (TUV model) s priestorovo sústredenými parametrami sme kalibrovali v troch klimaticky rozdielnych obdobiach medzi rokmi 1981 – 2010 pre dve skupiny rakúskych povodí (snehová a pôdna skupina), ktoré reprezentujú rozdielne klimatické a fyzicko-geografické podmienky. Model bol parametrizovaný pomocou kombinácie Nash-Sutcliffovho koeficientu (NSE) a logaritmického Nash-Sutcliffovho koeficientu (logNSE). V prvej časti práce sme posúdili účinnosť modelu v rozdielnych skupinách povodí z hľadiska objemovej chyby (volume error VE). Zistili sme, že účinnosť modelu sa v priebehu času menila. Model ukázal tendenciu podhodnotenia prietokov (5 % v snehovej skupine povodí a 7 % v pôdnej skupine povodí), vo validácii (1981 - 1990), keď boli parametre modelu optimalizované v súčasnejších rokoch (2001 - 2010). V nasledujúcom sme sa zamerali na identifikáciu faktorov, ktoré majú vplyv na účinnosť modelu vo validačnom období pre dve rozdielne skupiny povodí. Na uvedené sme použili techniku rozhodovacích stromov, pomocou ktorej sme zistili, že zmena zrážok (ΔP) mala najväčší vplyv na účinnosť modelu (VE) v snehovej skupine povodí. Naproti tomu, nadmorská výška mala najväčší vplyv na účinnosť modelu v pôdnej skupine povodí. Úloha hlavných klimatických charakteristík ako aj charakteristík povodí je popísaná v závere.

Kľúčové slová: TUV model, objemová chyba, rozhodovacie stromy

Patrik Sleziak: IDENTIFICATION OF FACTORS AFFECTING THE EFFICIENCY OF A HYDROLOGICAL MODEL BY DECISION TREES.

Annotation: The present study deals with the identification of factors which have an impact on the efficiency of a hydrological model. A conceptual rainfall-runoff model (TUV model) was calibrated for climatically different periods between 1981-2010 in two contrasting groups of Austrian catchments (snow and soil group of catchments) which represent a wide range of climate and physiographic conditions of Austria. The combination of the Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) and the logarithmic Nash-Sutcliffe coefficient (logNSE) was selected as the criterion for the model parametrization. In the first part, we assessed the model efficiency in terms of volume error (VE). We found that the model efficiency has changed over time. The model showed a tendency overestimated flows (5% in snow group of catchments and 7% in soil group of catchments) in the validation (1981-1990), when the model parameters were optimized in more recent years (2001-2010). Next, we have focused on identification of factors which have an impact on the model efficiency in the validation for two different groups of catchments. For this task, we used a technique of decision trees by which we found that the change of precipitation is the most significant characteristic which influence of model efficiency in the snow group of catchments. The results also showed that the elevation is the most significant characteristic affecting the model efficiency in the soil group of catchments. The role of relevant climatic and catchment characteristics is discussed in conclusion.

Key words: TUV model, volume error, decision trees

Úvod

Kvantifikácia vplyvu zmeny klímy na vodný režim krajiny je diskutovanou témou súčasných vedeckých štúdií. Táto úloha zahŕňa viacero krokov: výber emisných scenárov, spustenie globálnych cirkulačných modelov (GCM), zmenšenie výstupov do mierky, v ktorej pracujeme, použitie hydrologických modelov. Štvrtý krok je všeobecne považovaný, že prispieva menej k celkovej neistote (Wilby, 2005; Merz a kol., 2011). Napriek tomu viacero autorov upozorňuje, že neistotu, spojenú s odhadom parametrov v hydrologických modeloch, netreba zanedbať (Vaze a kol. 2010; Merz a kol. 2011; Coron a kol. 2012). S odhadom parametrov v modeloch súvisí aj účinnosť hydrologického modelu. V poslednom období sa čoraz väčšia pozornosť venuje účinnosti hydrologických modelov v rozdielnych časových obdobiach. Na uvedené poukazujú štúdie Perrin a kol. (2008), Merz et al. (2011), Coron et al. (2012), Bai a kol. (2015). Autori v nich konštatujú, že rozdiely v kalibrácii a validácii modelu cez rozdielne časové obdobia by mohli výrazne ovplyvniť účinnosť modelu. Klemeš (1986) bol prvý, kto upozornil na potrebu testovať účinnosť modelov v rozdielnych časových obdobiach. Navrhol test (Differential Split-Sample Test “DSST”), ktorého princíp spočíva v tom, že kalibračné a verifikačné obdobia sú vybrané na základe ich klimatických odlišností (t. j. kalibrácia a verifikácia prebieha rozdelenej vzorke údajov). Aplikácie tohto testu je možné nájsť vo viacerých štúdiách (Oudin a kol., 2006; Bai a kol. 2011; Magand a kol. 2015). Štúdia Oudin a kol. (2006) bola zameraná na posúdenie účinnosti dvoch hydrologických modelov (GRJ4 a TOPMODEL) v rozdielnych klimatických obdobiach. Autori pozorovali, že účinnosť modelov sa v čase znížila. Štúdia tiež ukázala, že účinnosť modelov v rozdielnych obdobiach bola spojená s klimatickými charakteristikami (priemerné ročné úhrny zrážok, priemerná ročná teplota vzduchu). Bai a kol. (2015) porovnal účinnosť 12 hydrologických modelov v rozdielnych časových obdobiach pre 153 povodí v Číne. Výsledky ukázali, že účinnosť modelov sa v priebehu času znížila. Autori tiež zistili, že klimatické charakteristiky (najmä aridita) a charakteristiky povodí (najmä plocha povodí) mali najväčší vplyv na účinnosť modelov. Coron a kol. (2012) kalibrovali a validovali tri hydrologické modely pre 216 povodí v Austrálii a analyzovali vzťah medzi účinnosťou modelov a klimatickými charakteristikami. Autori zistili, že zmeny v priemerných ročných zrážkach mali zásadný vplyv na účinnosť modelu. Magand a kol. (2015) použili fyzikálne založený CLMS (“Catchment Land Surface Model”) na vyšetrenie vzťahu medzi účinnosťou modelu a rozdielnymi charakteristikami. Záverom konštatujú, že klimatické charakteristiky mali hlavný vplyv na účinnosť modelu. Le Lay a kol. (2007) použili rozdielne hydrologické modely pre rozdielne povodia v Afrike a nezistil podobné závislosti medzi účinnosťou modelu a rozdielnymi charakteristikami.

Z uvedeného je zrejmé, že existuje priestor na poskytnutie jasnejších záverov v súvislosti s identifikáciou hlavných faktorov, resp. kombinácie faktorov, ktoré majú zásadný vplyv na účinnosť hydrologického modelu. Merz a kol. (2011) konštatujú, že častokrát existujú len zložité korelácie medzi účinnosťou modelu, vyjadrenou pomocou objemovej chyby a rozdielnymi charakteristikami, a preto treba poskytnúť robustnejšie závery na túto tému, a zároveň vzťahovať tieto závery na rozmanitejšie klimatické a fyzicko-geografické podmienky. Predložená práca sa zameriava práve na uvedené a jej cieľom je zistiť, ktoré charakteristiky (klimatické/charakteristiky povodí) majú hlavný vplyv na účinnosť hydrologického modelu.

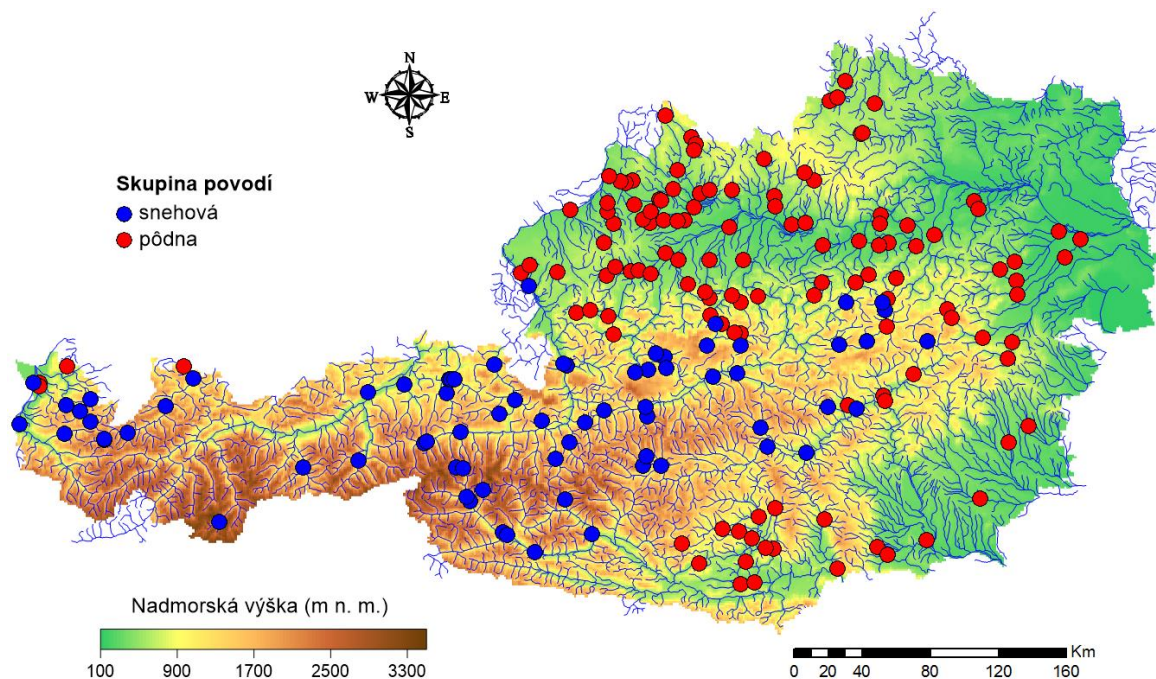
Práca je organizovaná nasledovne. V prvej časti sme opísali použitý súbor údajov, ktorý pozostával z 213 rakúskych povodí. Ďalšia časť práce obsahuje charakteristiku a opis použitého modelu (TUW model). V nasledujúcej časti sme sa venovali kalibrácii a verifikácii uvedeného modelu, ako aj posúdeniu účinnosti modelu z hľadiska objemovej chyby. Ďalšia

časť je venovaná technike regresných stromov, kde sme najskôr teoreticky priblížili túto techniku, a následne sme ju aplikovali na zistenie faktorov, ktoré majú vplyv na účinnosť hydrologického modelu. Posledná časť obsahuje závery.

Vstupné údaje

Predkladaná práca sa zameriava na územie Rakúska. Analyzovali sa údaje zo 197 rakúskych povodí, ktoré predstavujú reprezentatívnu vzorku rozdielnych klimatických a fyzicko-geografických podmienok (obr. 1). Údaje boli použité v dennom časovom kroku za obdobie od 1.1.1981 do 31.12.2010 a pozostávali z priemerných denných úhrnov zrážok na povodí, priemernej dennej teploty vzduchu na povodí, priemernej dennej evapotranspirácie na povodí a priemerného denného prietoku v uzatvárajúcom profile povodí.

Rakúsko je rovinaté, mierne zvlnené na východe a severe a vysokohorské na západe a juhu. Plocha povodí je v rozsahu od 25 do 6100 km². Nadmorská výška sa pohybuje v intervale od 100 do 3300 metrov nad morom. Priemerné ročné zrážky sa pohybujú v rozpätí od 400 mm na východe až takmer po 3000 mm na západe. Priemerná ročná teplota je v rozsahu od -8 °C do 10 °C. Na základe senzitivity parametrov modelu voči zvolenej cieľovej funkcii boli rakúske povodia rozdelené do dvoch skupín (snehová a pôdna skupina). Prvú skupinu tvoria povodia (71), kde sa prejavil ako najsenzitívnejší DDF (degree day factor). Na základe toho, že tento parameter patrí medzi snehové parametre modelu, označili sme túto skupinu povodí ako snehovú. Väčšina z týchto povodí sa nachádza v západnej (alpskej) časti Rakúska, kde odtokový režim je ovplyvnený snehom (obr. 1). Druhá skupina pozostáva z povodí (126), kde sa pôdna kapacita (FC) a parameter tvorby odtoku (BETA) prejavili ako najsenzitívnejšie. Vzhľadom k tomu, že tieto parametre patria medzi pôdne parametre modelu, túto skupinu sme označili ako pôdnu skupinu. Väčšina z týchto povodí sa nachádza v nížinatých, východných častiach Rakúska, kde odtokový režim je ovplyvnený zrážkami (obr. 1).



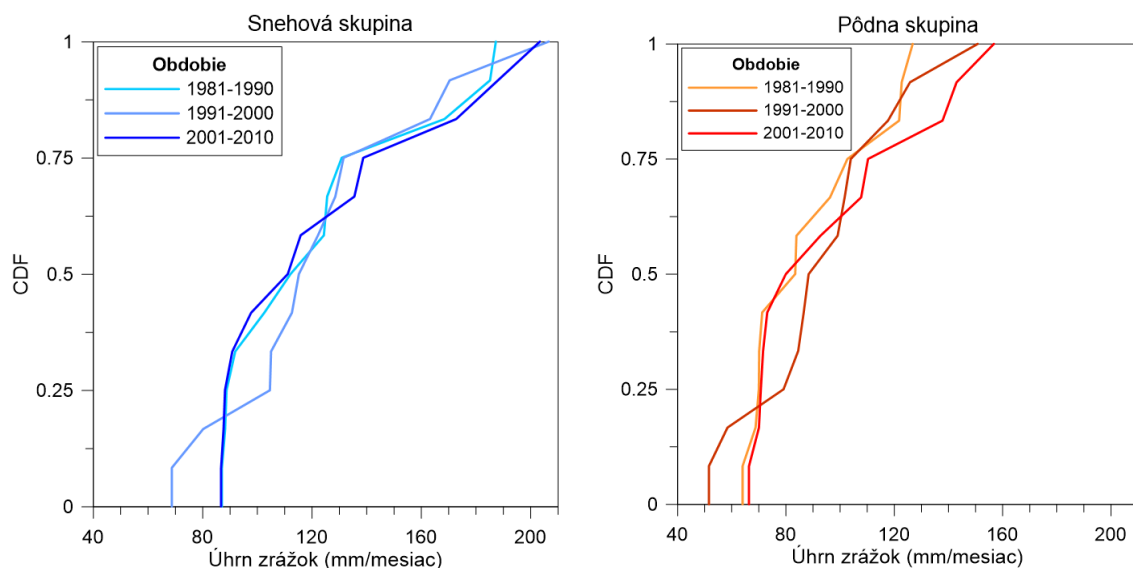
Obr. 1. Mapa Rakúska s vybranými prietokomernými stanicami.

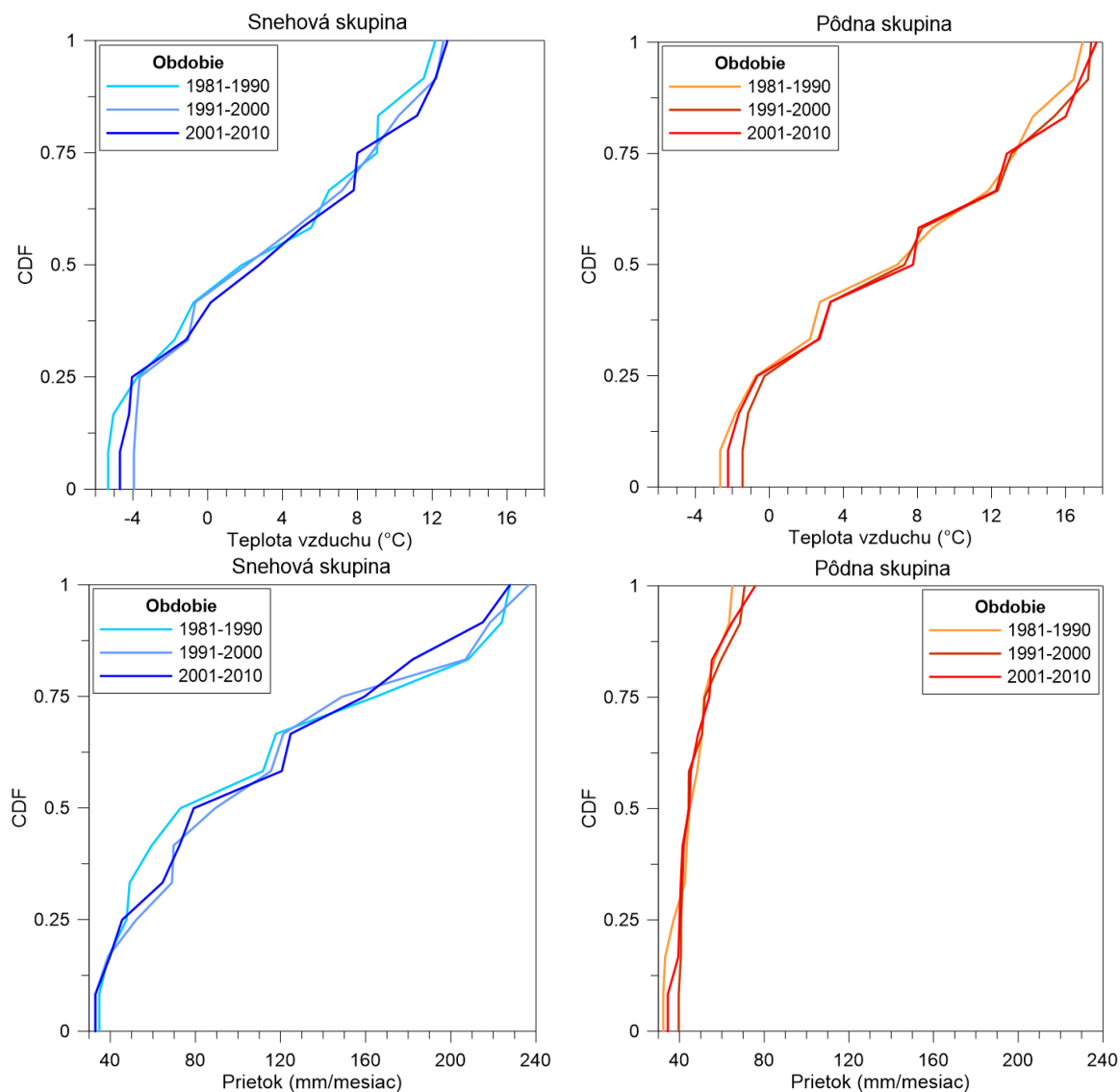
Pre lepšiu ilustráciu klimatickej variability medzi dvoma rozdielnymi skupinami povodí v rozdielnych časových obdobiach boli zobrazené čiary kumulatívnych distribučných funkcií vypočítaných pre rozdielne klimatické charakteristiky (priemerný mesačný úhrn zrážok,

priemerná mesačná teplota vzduchu, priemerný mesačný prietok) (obr. 2). Z obr. 2 môžeme pozorovať, že existujú rozdiely medzi jednotlivými skupinami povodí v špecifických obdobiach. Uvedené je dokumentované v tab. 1, kde sú pre lepšie porovnanie s obr. 2 uvedené stredné hodnoty vybraných klimatických charakteristík pre rozdielne skupiny povodí v jednotlivých obdobiach. Z obr. 2 (hore vľavo) môžeme vidieť, že povodia v snehovej skupine dosahovali priemerné mesačné úhrny zrážok v rozmedzí od 70 mm/mesiac do 200 mm/mesiac. Taktiež môžeme pozorovať, že polovica povodí tejto skupiny dosahovala mesačné hodnoty úhrnov zrážok menšie ako 112 mm/mesiac (obdobie 1981 – 1990), hodnoty menšie ako 115 mm/mesiac (obdobie 1991 – 2000) a hodnoty menšie ako 111 mm/mesiac (2001 – 2010). Z uvedeného vyplýva, že obdobie 1991 – 2000 bolo zrážkovo bohatšie. Naproti tomu, priemerné mesačné úhrny zrážok v pôdnej skupine povodí (obr. 2, hore vpravo) sa pohybovali od 45 mm/mesiac do 160 mm/mesiac. Taktiež je viditeľné, že polovica povodí pôdnej skupiny dosahovala mesačné hodnoty úhrnov zrážok menšie ako 83 mm/mesiac (obdobie 1981 – 1990), hodnoty menšie ako 88 mm/mesiac (obdobie 1991 – 2000) a hodnoty menšie ako 80 mm/mesiac (2001 – 2010). V tejto skupine sa taktiež obdobie 1991 – 2000 ukázalo ako zrážkovo výdatnejšie.

Opačný scenár môžeme pozorovať v prípade priemerných mesačných teplôt vzduchu pre snehovú a pôdnu skupinu povodí. Variabilita priemernej mesačnej teploty vzduchu pre snehovú skupinu povodí (obr. 2, v strede, vľavo) sa pohybovala od -2 °C do 12 °C. Polovica povodí tejto skupiny dosahovala mesačné hodnoty teplôt menšie ako 1,8 °C (obdobie 1981 – 1990), hodnoty menšie ako 2,1 °C (obdobie 1991 – 2000) a hodnoty menšie ako 2,7 °C (2001 – 2010). Z uvedeného je zrejmé, že tretie obdobie (2001 – 2010) sa ukázalo ako najteplejšie. V prípade pôdnej skupiny povodí (obr. 2, v strede, vpravo) hodnoty teploty vzduchu variovali v rozpätí od -3 °C do 18 °C. Polovica povodí tejto skupiny dosahovala mesačné hodnoty teplôt menšie ako 6,9 °C (obdobie 1981 – 1990), hodnoty menšie ako 7,3 °C (obdobie 1991 – 2000) a hodnoty menšie ako 7,8 °C (2001 – 2010). Z výsledkov je zrejmé, že tretie obdobie (2001 – 2010) sa prejavilo ako najteplejšie.

Obr. 2 poskytuje informáciu aj o priemernom mesačnom prietoku pre rozdielne skupiny povodí. Môžeme pozorovať, že povodia v snehovej skupine dosahovali priemerné mesačné prietoky v rozpätí 30 mm/mesiac až 240 mm/mesiac a povodia v pôdnej skupine dosahovali hodnoty v rozsahu od 30 do 80 mm/mesiac. Taktiež môžeme vidieť, že v snehovej skupine povodí sa obdobie 1991 – 2000 javí ako vodnejšie (Tab. 1) a v pôdnej skupine povodí je prietokový režim približne konštantný.





Obr. 2. Variabilita priemerných mesačných úhrnov zrážok, teploty vzduchu a prietokov pre rozdielne skupiny povodí v jednotlivých časových obdobiach.

Úhrn zrážok (mm/mesiac)	1981 – 1990	1991 – 2001	2001 – 2010
Snehová skupina	112	115	111
Pôdna skupina	83	88	80
Teplota vzduchu (°C)	1981 – 1990	1991 – 2001	2001 – 2010
Snehová skupina	1.8	2.1	2.7
Pôdna skupina	6.9	7.3	7.8
Prietok (mm/mesiac)	1981 – 1990	1991 – 2001	2001 – 2010
Snehová skupina	73	89	79
Pôdna skupina	45	44	45

Tab. 1. Porovnanie stredných hodnôt vybraných klimatických charakteristík pre rozdielne skupiny povodí v jednotlivých časových obdobiach.

Charakteristika a opis modelu TUW

Na modelovanie bol použitý koncepčný zrážkovo-odtokový model TUW (“Technische Universität Wien“) s priestorovo sústredenými parametrami, ktorý pracuje v dennom časovom kroku (Viglione a Parajka, 2014). Model obsahuje 15 parametrov, ktorých hodnoty sú odhadované pomocou kalibrácie. Štruktúra modelu vychádza z fyzikálnej koncepcie a tvoria ju 3 submodely: snehový, pôdny a odtokový. Snehový submodel simuluje topenie snehu v povodí. Pôdny submodel reprezentuje hydrologické procesy, ktoré prebiehajú pod zemským povrchom. Odtokový submodel transformuje nadbytočnú vodu z modelu na výpočet pôdnej vlhkosti pomocou dvoch nádrží. Podrobnejší opis štruktúry modelu je uvedený v práci Parajka a kol. (2007). Model TUW využíva na simulovanie zrážkovo-odtokového procesu nasledovné údaje: priemerné denné teploty vzduchu na povodie, priemerné denné úhrny zrážok na povodie, hodnoty priemernej dennej potenciálnej evapotranspirácie na povodie a priemerné denné prietoky v záverečnom profile povodia.

Kalibrácia a verifikácia modelu TUW

V práci sme aplikovali Differential Split-Sample Test (DSST), kde kalibrácia a verifikácia prebieha na rozdelenej vzorke údajov (Klemeš, 1986). Dané rady údajov sme rozdelili na tri obdobia (1981 – 1990, 1991 – 2000, 2001 – 2010) začínajúc mesiacom január až po december, pre ktoré sme následne kalibrovali a verifikovali model. Pre kalibráciu modelu sme použili automatickú kalibráciu pomocou diferenciálneho evolučného algoritmu Deoptim (Ardia a kol., 2011). Ako optimalizačné kritérium bola použitá kombinácia Nash-Sutcliffovho koeficientu (Nash a Sutcliffe) a logaritmického Nash-Sutcliffovho koeficientu (Merz a kol. 2011). Účinnosť modelu sme hodnotili pomocou objemovej chyby (volume error VE), ktorú môžeme matematicky zapísať v nasledovnom tvare:

$$VE = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{sim}^i - \sum_{i=1}^n Q_{obs}^i}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}^i} \quad (1),$$

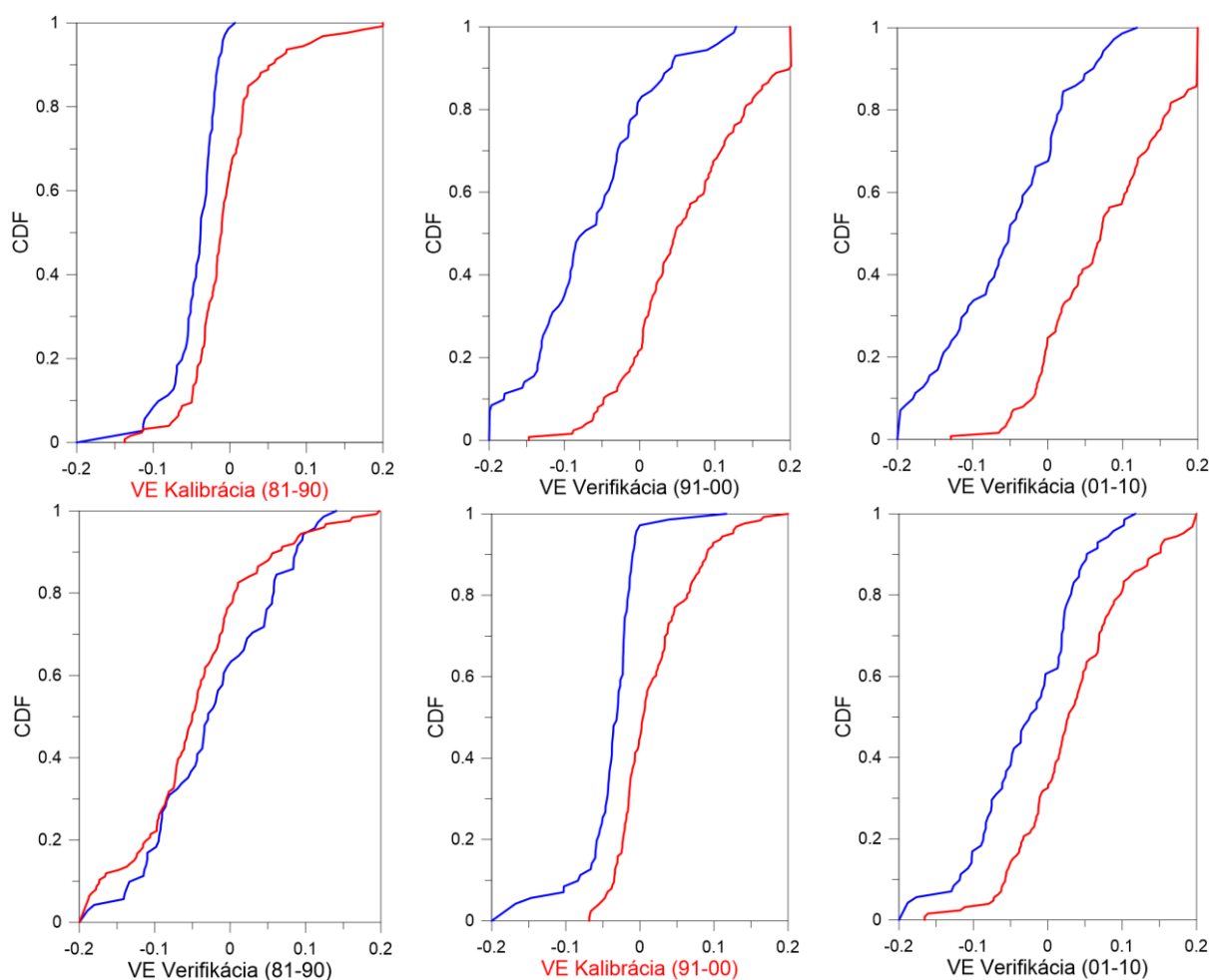
kde Q_{sim} a Q_{obs} sú simulovaný a pozorovaný prietok. $VE = 0$ indikuje, že nenastali žiadne zmeny medzi pozorovaným a simulovaným prietokom. Hodnoty $VE < 0$ a $VE > 0$ označujú podhodnotenie a nadhodnotenie prietokov (Merz a kol. 2011).

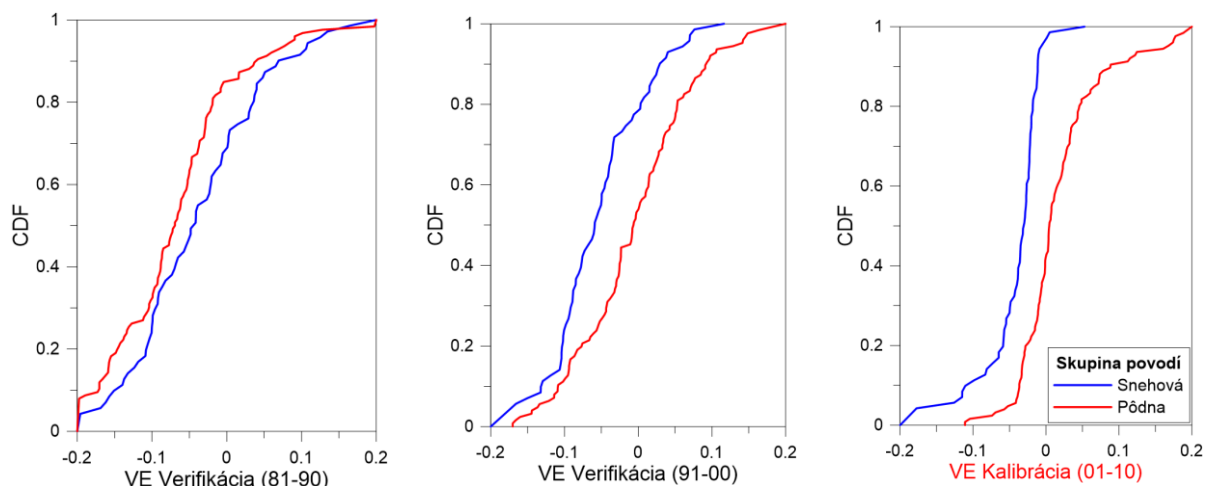
Obr. 3 zobrazuje variabilitu objemovej chyby (VE %) na základe kumulatívnych distribučných čiar vypočítaných pre dve rozdielne skupiny povodí (snehová a pôdna skupina) v špecifických časových obdobiach. Vypočítané stredné hodnoty VE sú zosumarizované v Tab. 2. Z obr. 3 a tab. 2 môžeme identifikovať, že stredné hodnoty VE pre jednotlivé kalibračné obdobia v snehovej skupine povodí boli nasledovné: -4 % (1981 – 1990), -3 % (1991 – 2000), -3 % (2001 – 2010). Z uvedeného je zjavná tendencia podhodnotenia prietokov u polovice snehovej skupiny povodí v jednotlivých kalibračných obdobiach. Naopak, u pôdnej skupiny povodí je viditeľný mierny trend nadhodnotenia prietokov v priebehu času (-1 %, 0,4 %, 0,4 %).

Z obr. 3 (hore) si môžeme všimnúť, že keď použijeme parametre z prvého kalibračného obdobia (1981 – 1990) vo validačnom období (1991 – 2000) u polovice snehovej skupiny povodí je viditeľná tendencia podhodnotenia prietokov o 7 %. Pre validačné obdobie 2001 – 2010 sa ukázal trend podhodnotenia prietokov o 5 %. Naopak, v prípade pôdnej skupiny povodí sa ukázala tendencia nadhodnotenia prietokov o 5 % (validácia 1991 – 2000) a 7 % (validácia 2001 – 2010).

Keď použijeme parametre z druhého kalibračného obdobia (1991 – 2000) (obr. 3 v strede), polovica snehovej skupiny povodí ukazuje tendenciu podhodnotenia prietokov o 3 % (validácia 1981 – 1990) a podhodnotenia prietokov o 2 % (validácia 2001 – 2010). Naproti tomu, polovica pôdnej skupiny povodí ukazuje vo validačnom období (1981 – 1990) trend podhodnotenia prietokov o 5 % a vo validačnom období (2001 – 2010) trend nadhodnotenia prietokov o 3 %.

Z obr. 3 (dole) si môžeme všimnúť, že keď boli parametre modelu optimalizované v súčasnejších rokoch (2001 – 2010), model ukázal tendenciu podhodnotenia prietokov u polovice povodí v snehovej skupine 5 % (validačné obdobie 1981 – 1990) a podhodnotenia prietokov 6 % (validačné obdobie 1991 – 2000). U pôdnej skupiny povodí bolo zistené podhodnotenie prietokov 1 % (validácia 1991 – 2000) a 7 % (validácia 2001 – 2010).





Obr. 3. Porovnanie čiar kumulatívnych distribučných funkcií (CDF) vypočítaných pre rozdielne skupiny povodí v špecifických kalibračných a verifikačných obdobiach.

Skupina povodí	K (81 – 90)	V (91 – 00)	V (01 – 10)
Snehová	-0.04	-0.07	-0.05
Pôdna	-0.01	0.05	0.07
Skupina povodí	V (81 – 90)	K (91 – 00)	V (01 – 10)
Snehová	-0.03	-0.03	-0.02
Pôdna	-0.05	0.004	0.03
Skupina povodí	V (81 – 90)	V (91 – 00)	K (01 – 10)
Snehová	-0.05	-0.06	-0.03
Pôdna	-0.07	-0.01	0.004

Tab. 2. Porovnanie stredných hodnôt objemovej chyby pre rozdielne skupiny povodí v špecifických kalibračných a verifikačných obdobiach.

Identifikácia faktorov ovplyvňujúcich účinnosť hydrologického modelu pomocou rozhodovacích stromov

Táto časť práce opisuje identifikáciu faktorov, ktoré majú hlavný vplyv na účinnosť modelu pomocou techniky rozhodovacích (regresných) stromov. Táto technika si vďaka svojej robustnosti a jednoduchej interpretácii výsledkov našla uplatnenie v mnohých odborných oblastiach (Seibert a kol., 16, Iourgulescu a Beven, 2004).

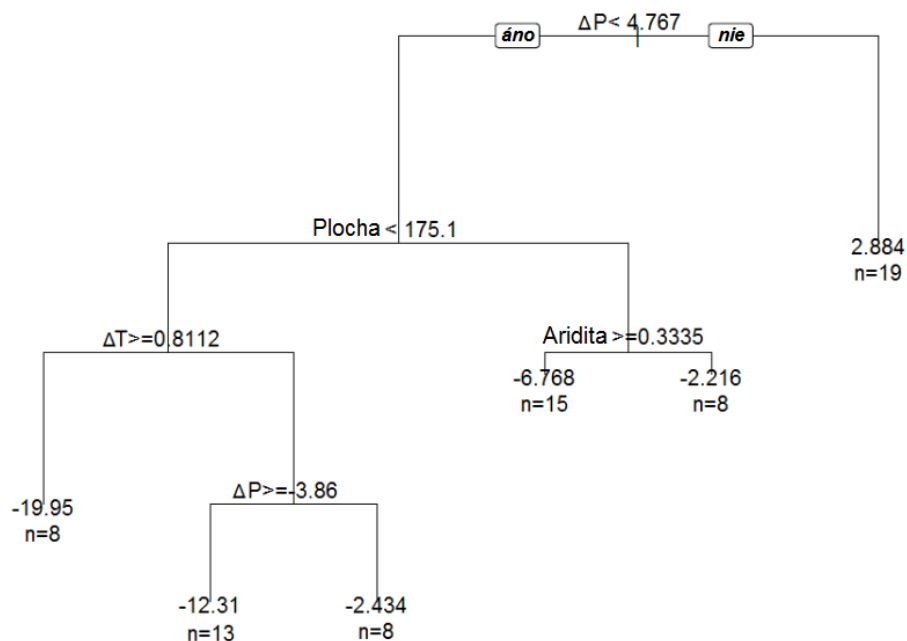
Najskôr teoreticky popíšme princíp spomínanej techniky, ktorý spočíva v tom, že sledujeme určitý objekt (v našom prípade objemová chyba vo validačnom období) a jeho vlastnosti, popísané vysvetľujúcimi veličinami (v našom prípade klimatické charakteristiky a charakteristiky povodí), na základe nich potom chceme určiť, akú hodnotu nadobúda veličina, o ktorú sa zaujíname (vysvetľovaná veličina). Výsledkom je binárny diagram, ktorý pozostáva z dvoch hlavných vetiev (ľavá a pravá). Začíname u koreňa stromu (horná časť), ak nasledujeme ľavú vetvu, zadaná podmienka v diagrame je pravdivá, naopak, ak nasledujeme pravú vetvu, zadaná podmienka neplatí. Medzi hlavné výhody tejto techniky patrí: jednoduchá a zrozumiteľná interpretácia výsledkov, schopnosť pracovať s chýbajúcimi pozorovaniami, technika je odolná voči outlierom (odľahlým hodnotám) (Švantner, 2008).

V tejto práci sme použili techniku rozhodovacích stromov na nájdenie kombinácie charakteristík (klimatických charakteristík a charakteristík povodí), ktoré majú zásadný vplyv

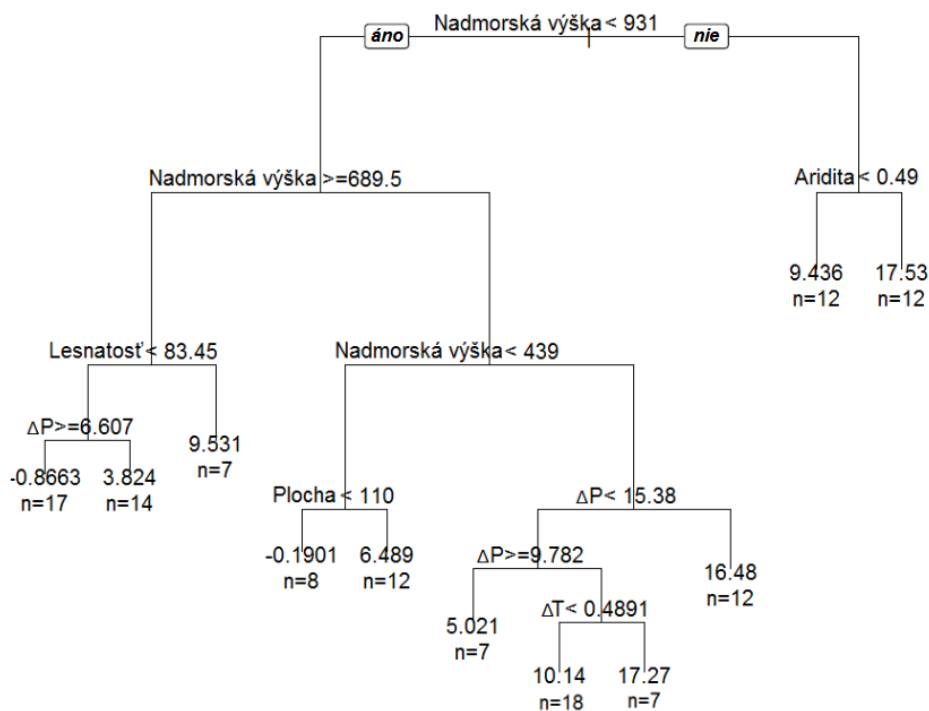
na účinnosť modelu vo validačnom období. Uvažovali sme s nasledovnými vstupnými hodnotami: vysvetľujúcou veličinou bola objemová chyba vo validačnom období (2001 – 2010). Túto veličinu sme chceli vysvetliť na základe kombinácie klimatických charakteristík a charakteristík povodí, pričom, klimatické charakteristiky pozostávali z aridity, zo zmeny priemerných ročných úhrnov zrážok ΔP a zmeny priemernej ročnej teploty vzduchu ΔT (zmena bola definovaná ako rozdiel obdobia 2001 – 2010 a obdobia 1981 – 1990 a ΔP bola vyjadrená percentuálnym zastúpením). Charakteristiky povodí tvorili: plocha povodia, nadmorská výška, sklon, lesnatosť.

V tejto práci sme techniku regresných stromov aplikovali v prostredí R (R Development Core Team), kde sme pomocou knižnice rpart (Therneau a kol., 2015) použili algoritmus CART (Classification and regression trees), pomocou ktorého sme zobrazili výsledné regresné stromy (obr. 4 a obr. 5). Z obr. 4 môžeme vidieť, že výsledný strom, pre vzťah medzi účinnosťou modelu (VE) vo validácii a charakteristikami snehovej skupiny povodí, má 6 listov a obsahuje aj listy s jedným prípadom. Číslo pod každým listom udáva hodnotu objemovej chyby vo validácii a “n” je počet povodí, kde bola táto hodnota dosiahnutá. Môžeme pozorovať, že charakteristiky, ktoré mali vplyv na účinnosť modelu vo validácii u snehovej skupiny povodí, boli nasledovné: ΔP , plocha povodia, ΔT , aridita. Vidíme, že v ľavej vetve stromu sú iba záporné hodnoty objemovej chyby. Najväčšia záporná hodnota - 19,95 %, ktorá indikuje približne (20 %) podhodnotenie prietokov (u 8 povodí snehovej skupiny) bola dosiahnutá za nasledovnej kombinácie podmienok: $\Delta P < 4,8 \%$, plocha $< 175,1 \text{ km}^2$, $\Delta T \geq 0,8 \text{ }^\circ\text{C}$. 15 povodí v snehovej skupine ukázalo tendenciu podhodnotenia prietoku približne 7 % za nasledovnej podmienky: $\Delta P < 4,8 \%$, plocha $> 151,1 \text{ km}^2$ a aridita $\geq 0,3$. Najviac povodí v tejto skupine (19) ukázalo tendenciu nadhodnotenia prietoku približne 3 % keď $\Delta P > 4,8 \%$. Z uvedeného je zrejmé, že zmena priemerného ročného úhrnu zrážok (ΔP) mala najväčší vplyv na účinnosť modelu vo validačnom období v snehovej skupine povodí.

Obr. 5 poskytuje informáciu o vzťahu medzi účinnosťou modelu (VE) vo validácii a charakteristikami pôdnej skupiny povodí. Z obr. 5 môžeme vidieť, že výsledný strom má 11 listov, je dosť rozsiahly a obsahuje aj listy s jedným prípadom. Charakteristiky, ktoré mali vplyv na účinnosť modelu vo validácii u tejto skupiny povodí boli: nadmorská výška, aridita, lesnatosť, ΔP , plocha povodia, ΔT . Najväčšia kladná hodnota, približne 18 %, ktorá indikuje nadhodnotenie prietokov (u 12 povodí), bola dosiahnutá za nasledovnej podmienky: nadmorská výška $> 931 \text{ m n. m.}$, aridita $> 0,5$. Najviac povodí tejto skupiny (18 povodí) ukázalo tendenciu nadhodnotenia prietoku približne 10 % za nasledovnej podmienky: $689,5 \text{ m n. m.} \geq \text{nadmorská výška} > 439 \text{ m n. m.}$, $\Delta P < 9,8 \%$, $\Delta T < 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Z výsledkov vyplýva, že nadmorská výška mala najväčší vplyv na účinnosť modelu vo validačnom období v pôdnej skupine povodí.



Obr. 4. Porovnanie vzťahu medzi účinnosťou modelu vo validácii a klimatickými charakteristikami/charakteristikami povodí pre snehovú skupinu.



Obr. 5. Porovnanie vzťahu medzi účinnosťou modelu vo validácii a klimatickými charakteristikami/charakteristikami povodí pre pôdnu skupinu.

Záver

Cieľom príspevku bola identifikácia faktorov, ktoré majú vplyv na účinnosť koncepčného zrážkovo-odtokového modelu TUW. Tento model sme kalibrovali v troch klimaticky rozdielnych obdobiach pre dve rozdielne skupiny rakúskych povodí (snehová skupina a pôdna

skupina). V prvej časti práce sme hodnotili účinnosť modelu pre uvedené skupiny povodí pomocou objemovej chyby. Výsledky ukázali, že účinnosť modelu sa v priebehu času menila. Pozorovali sme napr. tendenciu podhodnotenia prietokov u polovice snehovej skupiny povodí v jednotlivých kalibračných obdobiach (-4 % v období 1981 – 1990, -3 % v období 1991 – 2000, -3 % 2001 – 2010). Taktiež sme pozorovali tendenciu podhodnotenia prietokov (5 % v snehovej skupine povodí a 7 % v pôdnej skupine povodí), vo validácii (1981 – 1990), keď boli parametre modelu optimalizované v súčasnejších rokoch (2001 – 2010). Tieto výsledky sú v kontexte s prácou Merz a kol. (2011), kde autori poukazujú na zmeny v účinnosti modelu pre rozdielne skupiny rakúskych povodí (vlhšie, mierne, suchšie povodia) v priebehu času. V ďalšej časti práce sme sa zamerali na identifikáciu faktorov, ktoré majú vplyv na účinnosť modelu vo validačnom období. Na uvedené sme použili techniku rozhodovacích (regresných) stromov, pomocou ktorej sme zistili, že zmena zrážok (ΔP) mala najväčší vplyv na účinnosť modelu (VE) v snehovej skupine povodí. Naproti tomu, nadmorská výška mala najväčší vplyv na účinnosť modelu v pôdnej skupine povodí. Tieto zistenia súhlasia s prácami autorov Oudina kol. (2006); Bai a kol. (2011); Coron a kol. (2012); Magand a kol., (2015), ktorý pozorovali vplyv klimatických charakteristík (najmä zmeny v úhrnoch zrážok) na účinnosť hydrologických modelov.

Literatúra

- [1] Ardia, D. – Mullen, K.M. – Peterson, B.G. – Ulrich, J. 2015. *DEoptim: Differential evolution in R*. Version 2.2-3.
- [2] Bai, P. – Liu, X. – Lian, K. – Liu, X. 2015. *Comparison of performance of twelve monthly balance models in different climatic catchments of China*. Journal of Hydrology, 529, s. 1030-1040.
- [3] Coron, L. – Andréassian, V. – Perrin, C. – Lerat, J – Vaze, J. – Bourqui, M. – Hendrickx, F. 2012. *Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments*. Water Resour. Res., 48. W05552.
- [4] Iorgulescu, I. – Beven, K. J. 2004. *Nonparametric direct mapping of rainfall-runoff relationships: An alternative approach to data analysis and modeling?* Water Resources Research, Vol. 40, W08403.
- [5] Klemeš, V. 1986. *Dilettantism in hydrology: Transition or destiny?* Water Resour. Res, 22 (9), s. 177-188.
- [6] Le Lay, M. – Galle, S. – Saulnier, G. M. – Braud, I., 2007. *Exploring the relationship between hydroclimatic stationarity and rainfall-runoff model parameter stability: A case study in West Africa*. Water Resources Research 43, W07420. doi: 10.1029/2006WR005257.
- [7] Magand, C. – Ducharne, A. – Moine, N. – Brigode, P. 2015. *Parameter transferability under changing climate: case study with a land surface model in the Durance watershed France*. Hydrological Sciences Journal, 60:7-8, s. 1408-1423.

- [8] Merz, R. – Parajka, J. – Blöschl, G. 2011. *Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses*. Water Resour. Res., 28, s. 1015-1031.
- [9] Nash, J.E. – Sutcliffe, J.V. 1991. *River flow forecasting through conceptual models, part I – a discussion a principles*. Journal of Hydrology, 10, s. 282-290.
- [10] Oudin, L. – Perrin, Ch. – Mathevet, T. – Andréassian, V. – Michel, C. 1991. *Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency at the parameters of watershed models*. Journal of Hydrology, 320, s. 62-83.
- [11] Parajka, J. – Merz, R. – Blöschl, G. 2007. *Uncertainty and multiple calibration in regional water balance modelling case study in 320 Austrian catchments*. Hydrol. Process., 21, s. 423-446. Doi: 10.1002/hyp.6253.
- [12] Perrin, C. – Andréassian, V. – Rojas-Serna, C. – Mathevet, T. – Le Moine, N. 2008. *Discrete parameterization of hydrological models: Evaluating the use of parameter sets libraries over 900 catchments*. Water Resour. Res., 44, W08447, doi:10.1029/2007WR006579.
- [13] R Development Core Team. 2011. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.
- [14] Seibert, M. – Merz, B. – Apel, H. 2016. *Seasonal forecating of hydrological drought in the Limpopo basin: A comparison of statistical methods*. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.
- [15] Švantner, M. 2008. *Klasifikační a regresní stromy*. Bakalářské práce, Univerzita Karlova v Praze.
- [16] Therneau, T. – Atkinson, B. – Ripley, B. 2015. Rpart: Recursive partitioning for classification. Version 4.1-10. <https://cran.r-project.org/web/packages/rpart/rpart.pdf>.
- [17] Vaze, J. – Post, D. A., Chiew, F. H. S. – Perraud, J. M. – Viney, N. R. – Teng, J. 2010b. *Climate nonstationarity—Validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climatic changes studies*. J. Hydrol., 394(3–4), s. 447– 457, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.09.018.
- [18] Viglione, A. and Parajka, J. 2014. *TUWmodel: Lumped hydrological model for educational purposes*. Version 0.1-4.
- [19] Wilby, R. 2005. *Uncertainty in water resource model parameters used for climate change impact assessment*. Hydrol. Processes, 19, 3201–32219, doi:10.1002/hyp.5819.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0497-15 a projektom VEGA č. 1/0776/13 a VEGA č. 1/0710/15. Pod'akovanie patrí aj Národnému štipendijnému programu Slovenskej republiky za finančnú podporu.

Patrik Sleziak: IDENTIFICATION OF FACTORS AFFECTING THE EFFICIENCY OF A HYDROLOGICAL MODEL BY DECISION TREES.

This article presents the use of a technique of regression trees for the identification of factors affecting the efficiency of a hydrological model. In the first part, a conceptual rainfall-runoff model (TUW model) was calibrated to contrasting periods between 1981-2010 in different groups of Austrian catchments (snow and soil group). Subsequently, the model efficiency was tested in terms of volume error (VE). The results showed that the model efficiency has changed over time. This was demonstrated on the cumulative distribution function curves calculated for two different groups of catchments. Later in this article we used a technique of regression trees to identify which combination of characteristics (climatic and catchment characteristics) have an impact on model efficiency in the validation. The results showed that the change of precipitation is the most important factor which influences model efficiency in the snow group of catchments. To the contrary, the elevation is the most important factor affecting the model efficiency in the soil catchments.

Ing. Patrik Sleziak¹

¹Patrik Sleziak, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra vodného hospodárstva krajiny, Radlinského 11, 810 05, Bratislava, Slovenská republika, 0908 965 784, patrik.sleziak@stuba.sk