

Posúdenie využitia multikriteriálnej optimalizačnej funkcie pri modelovaní vodnej hodnoty snehu

Katarína Kotříková

Anotácia

Snehová pokrývka tvorí dôležitú časť hydrologickej bilancie, ktorá významne prispieva k odtoku a povodniam. Aj z týchto dôvodov je dôležité vedieť, ako sa snehová pokrývka a zásoba snehu v povodiach menia v čase a priestore. V práci bol použitý koncepčný zrážkovo-odtokový model s polo-rozčlenenými vstupmi s kalibráciou na jednu premennú, ako aj jeho modifikácia s kalibráciou na dve premenné. Tieto dva modely boli navzájom porovnané troma štatistickými prístupmi, a následne bola posúdená využiteľnosť multikriteriálnej optimalizačnej funkcie pri modelovaní vodnej hodnoty snehu.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: vodná hodnota snehu, zrážkovo-odtokový model, multikriteriálna optimalizačná funkcia

Annotation

The snow cover is an important part of the hydrological balance, significantly contributes to runoff, and floods. It is important to know how the snow cover changes across space and time because of that. In this work, a conceptual rainfall-runoff model with semi-distributed inputs was used, then this model has been modified for multi-variable calibration for various weight ratio of an objective function for flows and snow water equivalent. Three statistical methods were used to compare the quality of simulation of snow water equivalent, and the purpose of the multicriterial optimization function of modelling of the snow water equivalent was assessed.

KEYWORDS: snow water equivalent, rainfall-runoff model, multicriterial optimization function

1 Úvod

Vedomosti o časovej a priestorovej variabilite rozloženia snehovej pokrývky sú nutnosťou pre správnu predpoveď odtoku. Modelovaním snehovej pokrývky sa vo svete aj u nás zaoberá mnoho autorov. Zisťuje sa časové a priestorové rozloženie snehovej pokrývky (Pecho a kol., 2009), vplyv vegetácie na snehovú pokrývku (Niittynen a Luoto, 2017), modeluje sa vodná hodnota snehu (Krajčí a kol., 2017), najmä v horských oblastiach sa skúma vplyv topenia snehu na jarný odtok z povodí. Topenie snehu je dôležitým zdrojom odtoku a jeho modelovanie vo vysokohorských oblastiach je veľmi náročné. Pri modelovaní vodnej hodnoty snehu je možné využiť mnoho modelov, ako napríklad distribuovaný energeticky založený model UEB-EHZ (Parajka, 2001), semi-distribuovaný modelu HBV-light (Pekárová a Miklánek, 2006), koncepčný zrážkovo-odtokový model so sústredenými parametrami (Danko a kol., 2010), model WaSiM-ETH (Kostka, 2000), hydrologický model HYDROTEL (Oreiller a kol., 2014) a mnoho iných.

3 Príprava údajov

3.1 Použitý koncepčný zrážkovo-odtokový model

Zrážkovo-odtokový model Hron, programátorsky spracovaný v prostredí Matlab, vychádza zo základnej koncepcie modelu HBV (Bergström, 1976, 1992; Kubeš, 2007). Ide o koncepčný zrážkovo-odtokový model so sústredenými parametrami, ktorý zahŕňa koncepčné riešenia numerických popisov hydrologických procesov na úrovni povodia, resp. subpovodia. Povodie je v modeli schématicizované na 2 lineárne alebo nelineárne nádrže. Model pracuje v dennom časovom kroku a je tvorený z troch submodelov: snehového submodelu pre akumuláciu a topenie snehu, pôdneho submodelu pre výpočet množstva vody v pôde a aktuálnej evapotranspirácie, a odtokového submodelu pre transformáciu odtoku v rámci povodia, resp. transformáciu prietoku v koryte toku.

V modeli sú zabudované možnosti automatickej aj manuálnej kalibrácie parametrov pomocou genetických algoritmov a harmonického vyhľadávania, ako aj viaceré objektívne funkcie na posúdenie spoľahlivosti kalibrácie modelu. V tomto prípade je spoľahlivosť kalibrácie parametrov posudzovaná zhodou simulovaných a meraných priemerných denných prietokov v záverečnom profile povodia koeficientom Nash-Sutcliffe, ktorý možno vyjadriť nasledovne:

$$NS_Q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (1)$$

kde

NS_Q - Nash-Sutcliffov koeficient pre prietoky,

$Q_{obs,i}$ - pozorované prietoky v deň i [$m^3 \cdot s^{-1}$],

$Q_{sim,i}$ - simulované prietoky v deň i [$m^3 \cdot s^{-1}$],

\bar{Q}_{obs} - priemerná hodnota pozorovaných prietokov [$m^3 \cdot s^{-1}$] (Valent, 2011).

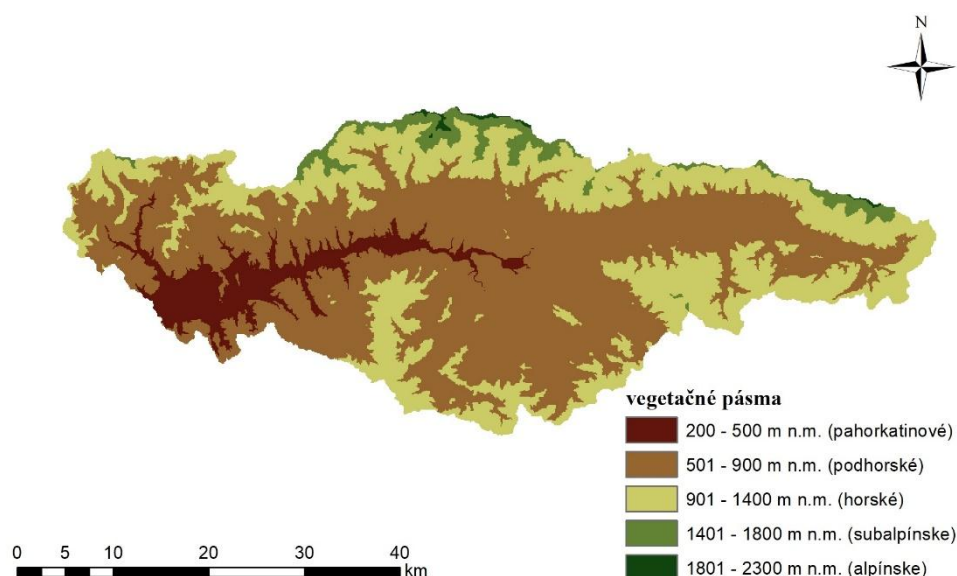
3.2 Zájmové územie

Povodie horného Hrona po Banskú Bystricu bolo vybrané pre porovnanie modifikácií zrážkovo-odtokového modelu. Hron je druhá najdlhšia slovenská rieka, meria 298 km a preteká len územím Slovenska, odvodňuje plochu o rozlohe 1768,2 km². Má snehovo-dažďový režim odtoku, najvyššie priemerné mesačné prietoky dosahuje v mesiaci apríl, najnižšie v mesiacoch január a február. Horná časť povodia má typický perovitý tvar. Charakter povodia ovplyvňuje aj výskyt povodní, väčšina sa vyskytuje na jar, čo je spôsobené topením snehu, ako aj zrážkovou činnosťou (Valent, 2014).

Na základe rozdelenia územia Slovenska do vegetačných výškových zón podľa Botanického ústavu Slovenskej akadémie vied (BÚ SAV, 2015) sme vybrali 5 vegetačných výškových zón (ďalej „vegetačné pásma“) podľa nadmorskej výšky hranice daných zón, ktoré boli použité ako čiastkové povodia pre modelovanie vodnej hodnoty snehu (Tabuľka 1, Obrázok 1).

Tabuľka 1: Rozdelenie zájmového povodia do vegetačných pásiem

Názov pásma	Hranice [m n. m.]	Priemerná výška pásma [m n. m.]	Plocha [km ²]	Váha
pahorkatinové	200 - 500	439	125,96	0,0710
podhorské	501 - 900	709	989,82	0,5597
horské	901 - 1400	1072	571,8	0,3233
subalpínske	1401 - 1800	1550	71,24	0,0403
alpínske	1801 - 2300	1726	27,38	0,0155



Obrázok 1: Rozdelenie povodia horného Hrona do vegetačných pásiem.

3.3 Spracovanie vstupných údajov

Do modelu vstupovali údaje z 23 zrážkomerných a klimatologických staníc za obdobie rokov 1981 – 2010 (Tabuľka 2), boli to denné úhrny zrážok, priemerné denné hodnoty teploty vzduchu, týždenné vodné hodnoty snehu, denné výšky snehovej pokrývky a priemerné denné prietoky v profile Banská Bystrica – vodomerná stanica č. 7160. Všetky vstupy boli priestorovo spracované do priemernej nadmorskej výšky vegetačného pásma. Na výpočet úhrnov zrážok pre vegetačné pásma bola použitá interpolačná metóda inverznej vzdialenosti, priemerná denná teplota bola dopočítaná pomocou lineárnej regresie v závislosti od nadmorskej výšky vegetačného pásma. Hodnoty potenciálnej evapotranspirácie boli počítané metódou Blaney-Criddle, pomocou priemernej dennej teploty a indexu oslnenia určeného v jednotlivých vegetačných pásmach (Výleta a kol., 2015). Týždenné hodnoty vodnej hodnoty snehu sa priestorovo interpretovali na základe lineárnej regresie v závislosti od nadmorskej výšky a za 4 podmienok, ktoré boli zároveň kontrolou správnosti vypočítaných hodnôt:

- 1) Ak sa v meraniach nachádzala hodnota vodnej hodnoty snehu, ale v danom dni nebola pozorovaná snehová pokrývka, hodnota sa vymazala.
- 2) Ak nebola meraná vodná hodnota snehu, ale v danom dni bola pozorovaná snehová pokrývka, hodnota sa neupravovala.
- 3) Ak bola meraná vodná hodnota snehu, a bola pozorovaná aj snehová pokrývka, hodnoty sa neupravovali. Upravovali sa iba v prípade, ak výška snehovej pokrývky sa blížila k 0 (výška snehovej pokrývky nižšia ako 0,5 cm, poprašok). V tomto prípade sa výsledná vodná hodnota snehu upravila na hodnotu 0.
- 4) Ak nebola meraná vodná hodnota snehu, a nebola meraná ani výška snehovej pokrývky, hodnoty ostali v pôvodnom tvare (Kotříková, 2018).

Tabuľka 2: Zoznam zrážkomerných a klimatologických staníc

Indikatív stanice	Názov stanice	x	y	z
34240	Banská Bystrica - Úľanka	-419982,34	-1222702,20	398
33140	Beňuš	-372148,39	-1221216,41	550
33180	Brezno	-380549,19	-1223346,28	490
34080	Brusno	-399858,39	-1223676,25	415
11916	Chopok*	-383572,90	-1207786,02	2008
33240	Čierny Balog - Krám	-382566,28	-1228347,83	522
34160	Dolný Harmanec	-423853,46	-1220305,09	481
33080	Heľpa	-356626,85	-1218924,54	657
34020	Jarabá	-375876,34	-1213724,87	857
34070	Jasenie	-393909,47	-1219359,83	537
34060	Jasenie, Na Kyslej	-395547,69	-1212742,74	705
11907	Krížna*	-421607,75	-1212483,68	1570
11910	Lom nad Rimavicou*	-381541,92	-1241325,42	1018
34140	Môlča	-411568,38	-1231872,19	459
34180	Motyčky	-414460,43	-1214720,25	650
34040	Mýto pod Ďumbierom	-380835,37	-1217321,56	610
33060	Pohorelá	-352727,08	-1218416,10	764
33160	Pohronská Polhora	-369604,80	-1229772,10	637
33120	Polomka	-364835,63	-1219994,13	607
34120	Slovenská Ľupča	-408409,07	-1226188,24	370
34220	Staré Hory	-419150,90	-1216508,39	475
33040	Šumiac	-345206,75	-1221606,62	887
11938	Telgárt*	-340585,58	-1221177,10	901

*klimatologické stanice

4 Modelovanie vodnej hodnoty snehu

4.1 Model 1: Zrážkovo-odtokový model so sústredenými parametrami a polo-rozčlenenými vstupmi

Koncepčný zrážkovo-odtokový model Hron bol modifikovaný na modelovanie pre rôzne vegetačné pásma, pričom vstupy aj výstupy sú priestorovo rozčlenené po jednotlivých pásmach.

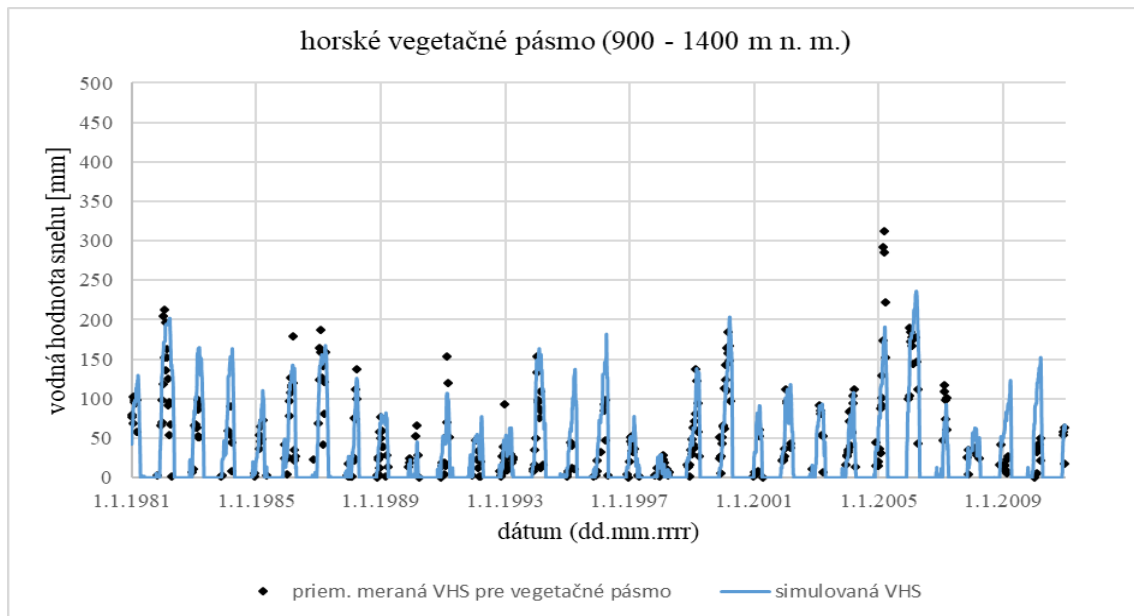
Priestorovo rozdelené výstupy modelu do vegetačných pásiem sú:

- AET – aktuálna evapotranspirácia [mm],
- VHS – vodná hodnota snehu [mm],
- SM – zásoba vody v pôdnej vrstve [mm].

Výstupy modelu ako priemer na povodie sú simulovaný prietok Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], ako aj výška vody v hornej a dolnej nádrži [mm].

Pre kalibráciu parametrov modelu bol použitý genetický algoritmus. Spoľahlivosť kalibrácie parametrov bola posudzovaná zhodou simulovanej a meranej vodnej hodnoty snehu (VHS) vo vegetačných pásmach povodia koeficientom Nash-Sutcliffe za obdobie posledných 30 rokov, 1981 – 2010.

V tomto prípade bolo obdobie rokov 1981 – 1995 použité na kalibráciu modelu, hodnota koeficientu Nash-Sutcliffe dosiahla hodnotu 0,8829. Na validáciu modelu sme použili údaje z obdobia rokov 1996 – 2010, hodnota koeficientu Nash-Sutcliffe dosiahla hodnotu 0,7979. Grafické porovnanie meraných a simulovaných hodnôt vodnej hodnoty snehu pre roky 1981 - 2010 v jednotlivých vegetačných pásmach ilustrujeme na Obrázku 2, kde čiernymi bodmi sú označené merané údaje vodnej hodnoty snehu pre vegetačné pásmo a modrou krivkou je označený kontinuálny simulovaný rad vodnej hodnoty snehu pre dané pásmo. Z porovnania vidieť uspokojivú zhodu medzi simulovanými a meranými priemernými hodnotami vodnej hodnoty snehu, rozdiely môžu byť spôsobené napr. problematickým určením priemeru na vegetačné pásmo povodia v prípade výpadku meraní v niektorých staniaciach.



Obrázok 2: Porovnanie meraných a simulovaných priemerných vodných hodnôt snehu (VHS) Modelom 1 v horskom vegetačnom pásme (priemerná nadmorská výška pásma je 1072 m n. m.).

4.2 Model 2: Multikalibrácia zrážkovo-odtokového modelu so sústredenými parametrami a polo-rozčlenenými vstupmi

V predchádzajúcom modeli bola použitá optimalizačná funkcia založená na Nash-Sutcliffovom koeficiente počítanom z hodnôt prietokov, ktorú sme v ďalšom kroku rozšírili aj na hodnoty vodnej hodnoty snehu. Túto funkciu „multivariable“ vo svojej práci použili viacerí autori (Senaviratne a kol., 2014; Výleta a kol., 2015). Umožňuje viacnásobnú objektívnu kalibráciu, ktorá prebiehala použitím údajov dennej hodnoty prietokov a týždennej hodnoty vodnej hodnoty snehu. Táto funkcia sa dá zapísať ako

$$f = w \cdot NS_Q + (1 - w) \cdot NS_{SWE} \quad (2)$$

kde

w - váha (hodnota 0 – 1),

NS_Q - Nash-Sutcliffov koeficient z hodnôt prietokov (vzorec 1 v kapitole 2.1.), kde do vzorca vstupovali ako pozorované hodnoty prietoky v záverečnom profile povodia,

NS_{SWE} - Nash-Sutcliffov koeficient z hodnôt vodnej hodnoty snehu, kde do vzorca vstupovala ako pozorovaná hodnota priemerná hodnota vodnej hodnoty snehu z vegetačných pásiem zohľadňujúca váhu pásma,

pričom

$$NS_{SWE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (SWE_{obs,i} - SWE_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (SWE_{obs,i} - \overline{SWE}_{obs})^2} \quad (3)$$

kde

NS_{SWE} - Nash-Sutcliffov koeficient z hodnôt vodnej hodnoty snehu,

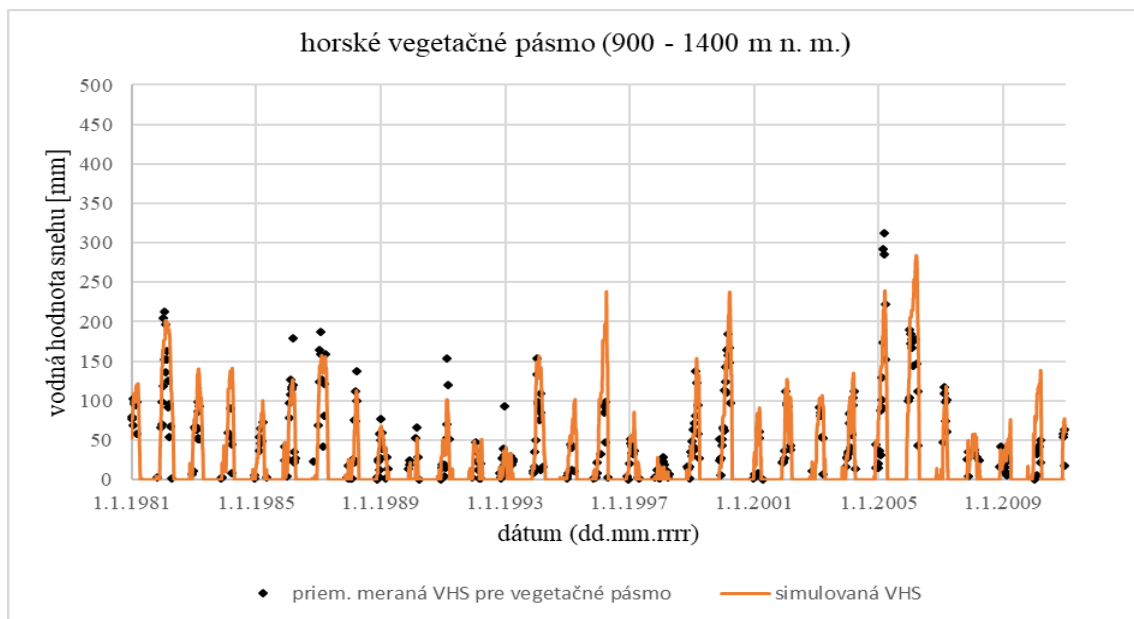
$SWE_{obs,i}$ - pozorovaná vodná hodnota snehu v deň i [mm],

$SWE_{sim,i}$ - simulovaná vodná hodnota snehu v deň i [mm],

\overline{SWE}_{obs} - priemerná pozorovaná hodnota vodnej hodnoty snehu [mm] (Kotříková, 2018).

Vstupné údaje boli rozdelené do vegetačných pásiem s príslušnou váhou záujmovej plochy. Celé skúmané obdobie rokov 1981 – 2010 sme rozdělili na dve obdobia, 1981 – 1995 a 1996 – 2010. Parametre modelu sme kalibrovali zvlášť pre každú váhu hodnoty prietokov a vodnej hodnoty snehu. Bolo urobených 10 na sebe nezávislých kalibrácií pre každú váhu v jednotlivých vegetačných pásmach v kroku 0,1 v rozsahu 0 a 1.

Ako najviac uspokojivý váhový pomer sa javil pomer $NS_Q = 70\%$ a $NS_{SWE} = 30\%$. Kombinované priemerné hodnoty Nash-Sutcliffovho koeficienta v kalibračnom období 1981 – 1995 dosiahli hodnotu 0,7753 a v prípade kalibračného obdobia rokov 1996 - 2010 bola táto hodnota 0,7348. Grafické porovnanie uvádzame pre kombinovaný rad hodnôt z kalibračných hodnôt príslušného váhového pomeru na Obrázku č. 3 pre horské vegetačné pásmo, kde čiernymi bodmi sú označené merané údaje vodnej hodnoty snehu pre vegetačné pásmo a oranžovou krivkou je označený kontinuálny simulovaný rad vodnej hodnoty snehu pre dané vegetačné pásmo.



Obrázok 3: Porovnanie meraných a simulovaných priemerných vodných hodnôt snehu (VHS) Modelom 2 v horskom vegetačnom pásme (priemerná nadmorská výška pásma je 1072 m n. m.).

5 Porovnanie modifikácií zrážkovo-odtokových modelov

Na porovnanie výsledkov použitých modelov sme zvolili tri prístupy, a to pomocou koeficientu korelácie, pomocou triedy odchýlok a grafickým spôsobom.

5.1 Koeficient korelácie

Korelácia je termín používaný na definovanie vzťahu medzi premennými, vyjadrený korelačným koeficientom, ktorý sa počíta podľa nasledovného vzorca:

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_i \left(\frac{x_i - \bar{x}}{dx} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}}{dy} \right) \quad (4)$$

kde

n - veľkosť vzorky,

x_i - meranie pre i -te pozorovanie premennej x ,

\bar{x} - priemerná hodnota všetkých pozorovaní premennej x ,

dx - štandardná odchýlka pozorovaní premennej x ,

y_i - meranie pre i -te pozorovanie premennej y ,

\bar{y} - priemerná hodnota všetkých pozorovaní premennej y ,

dy - štandardná odchýlka pozorovaní premennej y .

Koeficient korelácie R sa môže pohybovať od -1 do $+1$ vrátane. Sila vzťahu sa posudzuje podľa absolútnej veľkosti R , čím väčšia je absolútna hodnota R , tým silnejší bude vzťah medzi oboma premennými. Smer je reprezentovaný znakom korelačného koeficientu - záporný znak reprezentuje negatívnu koreláciu; pozitívny znak označuje pozitívnu koreláciu. Hodnota R rovná -1 alebo $+1$ znamená dokonale negatívnu alebo pozitívnu lineárnu koreláciu. Korelačný koeficient nula znamená, že dve premenné nie sú spojené, nie je medzi nimi žiadna korelácia (StatSoft, Inc., 1999).

V nasledujúcej Tabuľke č. 3 uvádzame hodnoty korelácie a slovný popis vyjadrujúci silu vzťahu premenných (Iskandar a kol., 2016).

Tabuľka 3: Hodnoty koeficientu korelácie

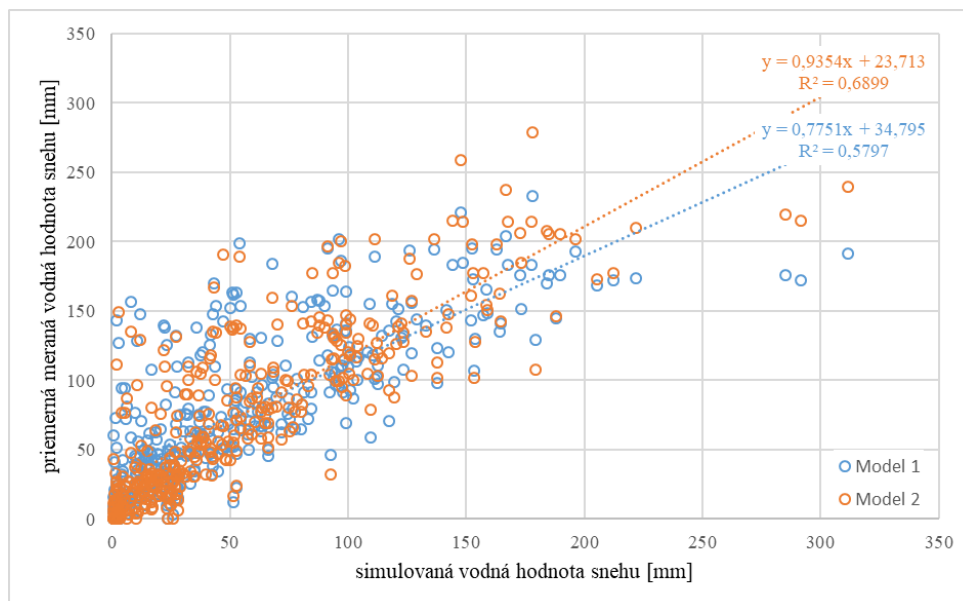
R (koeficient korelácie)	korelácia premenných
0	nie sú spojené
0,1 – 0,20	veľmi malá
0,21 – 0,40	malá
0,41 – 0,60	stredná
0,61 – 0,80	silná
0,81 – 0,99	veľmi silná
1	dokonalá korelácia

Pre oba modely, pre zrážkovo-odtokový model so sústredenými parametrami a polo-rozčlenenými vstupmi (ďalej aj ako „Model 1“), ako aj pre model s modifikáciou optimalizačnej funkcie (ďalej aj ako „Model 2“), sme zobrazili koreláciu pozorovaných a simulovaných hodnôt vodnej hodnoty snehu spolu s koeficientom determinácie R^2 , vypočítali koeficienty korelácie R pre všetky vegetačné pásma a zobrazili ich v prehľadnej tabuľke (Tabuľka 4).

Tabuľka 4: Hodnoty koeficientu determinácie R^2 a koeficientu korelácie R vo vegetačných pásmach

	Model 1		Model 2	
	R^2	R	R^2	R
pahorkatinové vegetačné pásmo	0,6728	0,8202	0,5214	0,7221
podhorské vegetačné pásmo	0,7706	0,8779	0,7697	0,8773
horské vegetačné pásmo	0,5797	0,7614	0,6899	0,8306
subalpínske vegetačné pásmo	0,3446	0,5871	0,4178	0,6464
alpínske vegetačné pásmo	0,2402	0,4901	0,3016	0,5491

Grafické zobrazenie korelácie a koeficientu determinácie R^2 uvádzame pre horské vegetačné pásmo na Obrázku 4.



Obrázok 4: Pomer meranej a simulovanej vodnej hodnoty snehu s rovnicou spoľahlivosti R^2 pre horské vegetačné pásmo.

Z hodnôt koeficientu korelácie môžeme vidieť, že v nižších vegetačných pásmach (pahorkatinové, podhorské a horské vegetačné pásmo) je korelácia premenných silná až veľmi silná (0,72 – 0,88). Vo vyšších vegetačných pásmach (subalpínske a alpínske vegetačné pásmo) je sila korelácie premenných stredná (0,49 – 0,59), aj keď v prípade Modelu 2 s modifikáciou optimalizačnej funkcie, ešte aj v subalpínskom pásme je korelácia premenných silná (0,65).

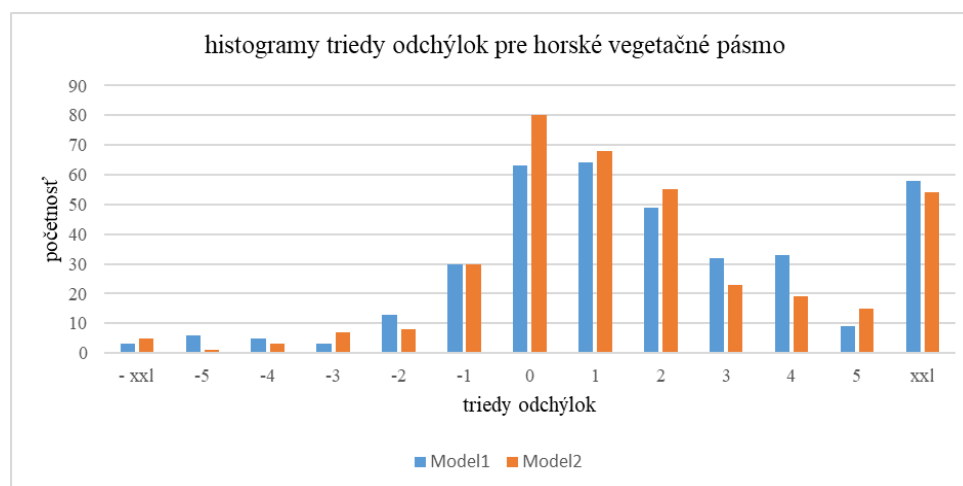
5.2 Histogram triedy odchýlok

V rámci ďalšej analýzy boli porovnané simulované hodnoty vodnej hodnoty snehu z oboch modelov s pozorovanými hodnotami, a následne bola vypočítaná odchýlka medzi simulovanou a pozorovanou hodnotou vodnej hodnoty snehu. Tieto odchýlky boli zaradené do tried podľa nasledujúcej tabuľky (Tabuľka 5):

Tabuľka 5: Triedy odchýlok

Triedy odchýlok	Rozsah
-xxl	< - 55
-5	- 55 až - 45
-4	- 45 až - 35
-3	- 35 až - 25
-2	- 25 až - 15
-1	- 15 až - 5
0	- 5 až 5
1	5 až 15
2	15 až 25
3	25 až 35
4	35 až 45
5	45 až 55
xxl	> 55

V ďalšom kroku boli spracované histogramy triedy odchýlok, kde boli porovnané oba modely vo všetkých vegetačných pásmach. Na Obrázku 5 uvádzame histogramy triedy odchýlok pre horské vegetačné pásmo Modelu 1 s polo-rozčlenenými vstupmi a Modelu 2 s modifikáciou optimalizačnej funkcie.



Obrázok 5: Histogramy triedy odchýlok pre horské vegetačné pásmo (priemerná nadmorská výška pásma je 1072 m n. m.).

Z Obrázku 5 je vidieť, že odchýlky v simulácií vodnej hodnoty snehu Modelom 2 s modifikáciou optimalizačnej funkcie sú menšie ako v prípade Modelu 1, väčšie množstvo modelovaných hodnôt spadá do tried s nižšou odchýlkou. Z histogramov je tiež vidieť, že v oboch prípadoch modely skôr nadhodnocujú simulované údaje.

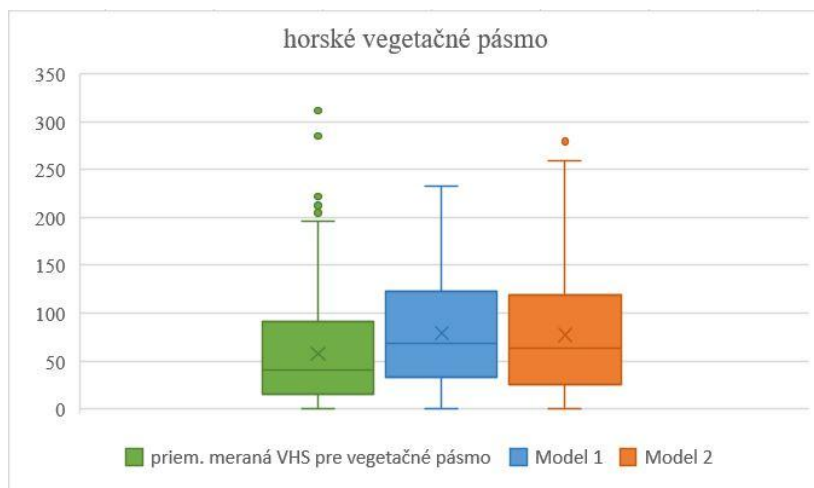
V nižších vegetačných pásmach (horské a podhorské vegetačné pásmo) sú odchýlky oveľa menšie, výraznejšie množstvo údajov spadá do -2 až 1 triedy odchýlok (najmä údaje z Modelu 2), teda oba modely skôr podhodnocovali údaje. V prípade subalpínskeho a alpínskeho vegetačného pásma, simulované údaje z oboch modelov spadajú do vyšších tried odchýlok, viac ako tretina spadá do triedy odchýlok xxl, teda oba modely výrazne nadhodnocujú simulované údaje.

5.3 Grafické porovnanie modelov

V poslednom kroku sme pristúpili ku grafickému porovnaniu pozorovaných a simulovaných hodnôt vodnej hodnoty snehu, pomocou škatuľových grafov a základných štatistických údajov príslušných radov hodnôt.

Škatuľové grafy, tzv. boxploty, predstavujú grafické zhrnutie množstva údajov do piatich štatisticky významných čísiel, ide vlastne o vizuálny diagram „Päť číselného súhrnu“ akéhokoľvek súboru údajov, ktorý je používaný už do roku 1969 v štatistickej praxi. Päť číselný súhrn obsahuje hodnoty minimálneho koncového bodu grafu, prvého kvartil, mediánu (druhý kvartil), tretieho kvartil a hodnotu maximálneho koncového bodu grafu. Diagram zobrazuje aj tzv. outliery, odľahlé hodnoty, predstavujúce jednotlivé údaje vzdialené od mediánu viac ako samotné koncové body grafu (Whickham a Stryjewski, 2012).

Diagram pozorovaných a simulovaných hodnôt z oboch modelov ilustrujeme na Obrázku 6 pre horské vegetačné pásmo.



Obrázok 6: Vizualný diagram pozorovaných a simulovaných hodnôt vodnej hornoty snehu (VHS) pre vegetačné pásmo (priemerná nadmorská výška pásma je 1072 m n .m.).

Na diagrame môžeme sledovať, že kvartilové rozpätie simulovaných údajov je pomerne rovnaké, a oba modely nadhodnocujú simulované údaje. V prípade Modelu 2 je rozpätie koncových bodov grafu oveľa väčšie ako v prípade Modelu 1, avšak stredná hodnota simulovaných údajov sa nachádza bližšie k strednej hodnote pozorovaných údajov.

V prípade pahorkatinového vegetačného pásma je kvartilové rozpätie údajov výrazne menšie ako predpokladá pozorovaný rad údajov, v prípade Modelu 2 sa tu vyskytuje mnoho odľahlých hodnôt. V podhorskom vegetačnom pásme je kvartilové rozpätie pomerne rovnaké, aj mediány pozorovaných a simulovaných radov sú podobné. V subalpínskom a alpínskom vegetačnom pásme dochádza k výraznému zväčšeniu kvartilového rozpätia v porovnaní s pozorovaným radom údajov, a vidieť tu symetrickejšie rozdelenie simulovaných údajov v oboch simulovaných radoch údajov.

6 Záver

Údaje o výskyte snehovej pokrývky na našom území sa začali zaznamenávať už v polovici 19. storočia a od poslednej tretiny 20. storočia sa pravidelne zaznamenávajú a spracúvajú údaje o snehovej pokrývke v meteorologických pozorovaniach na našom území zo štandardnej pozorovacej meteorologickej siete. Akumulácia vody vo forme snehu v zimnom období a jeho následné topenie v jarnom období môže mať negatívny následok vo forme povodní. Preto je samotný monitoring, ako aj jeho spracovanie, a následné prognózovanie odtokovej situácie mimoriadne dôležité. Dôraz sa kladie hlavne na rýchle a kvalitné informácie, ktoré pomôžu eliminovať možné povodňové škody. V tomto príspevku kladieme dôraz na samotné modelovanie vodnej hodnoty snehu, dôležitosť prípravy vstupných údajov, správnu kalibráciu modelov, ako aj vhodnosť použitého zrážkovo-odtokového modelu.

Modelovaným územím bolo povodie horného Hrona po Banskú Bystricu, na jeho území môžeme sledovať postupné zvyšovanie priemernej ročnej teploty vzduchu až o 1,4°C, ako aj mierny pokles zrážok a priemerných ročných prietokov za obdobie posledných desaťročí (1961 – 2010) (Kotříková, 2018). Náročnosť modelovania horských povodí viedla k rozdeleniu celého povodia na čiastkové povodia na základe rozdelenia územia Slovenska podľa Botanického ústavu Slovenskej akadémie vied do vegetačných výškových zón (ďalej ako „vegetačné pásmo“). Na modelovanie boli použité dve modifikácie zrážkovo-odtokového modelu Hron. Model 1 simuloval hodnoty vodnej hodnoty snehu v jednotlivých vegetačných pásmach na základe polo-rozčlenených vstupov, spoľahlivosť kalibrácie parametrov bola posudzovaná zhodou simulovaných a meraných priemerných denných prietokov v záverečnom profile povodia koeficientom Nash-Sutcliffe. V Modeli 2 bola optimalizačná funkcia Nash-Sutcliffe rozšírená o posudzovanie zhody týždenných meraných a priemerných týždenných

simulovaných hodnôt vodnej hodnoty snehu v jednotlivých vegetačných pásmach. Spoľahlivosť týchto modelov navzájom bola porovnaná aj s pozorovanými hodnotami vodnej hodnoty snehu.

Použité metódy na porovnanie kvality simulácie vodnej hodnoty snehu boli koeficient korelácie, histogram triedy odchýlok a grafické porovnanie pomocou škatuľových grafov, tzv. boxplotov. Koeficienty korelácie v nižších vegetačných pásmach (do 1400 m n. m.) potvrdili silnú až veľmi silnú koreláciu premenných v oboch modeloch. Vo vyšších vegetačných pásmach (nad 1400 m n. m.) hodnoty koeficientu vyjadrovali skôr slabú koreláciu, avšak v Modeli 2 boli hodnoty korelácie vyššie v porovnaní s Modelom 1, dokonca v subalpínskom pásme (1400 – 1800 m n. m.) dosahovali silnú koreláciu premenných.

Z rozdelenia do tried odchýlok je zrejmé, že v nižších vegetačných pásmach väčšie množstvo simulovaných údajov z Modelu 2 spadá do nižších tried odchýlok v porovnaní s Modelom 1. Avšak vo vyšších vegetačných pásmach môžeme pozorovať zaradenie viac ako tretiny simulovaných údajov do najvyššej triedy odchýlok v oboch modeloch. Histogramy triedy odchýlok naznačujú aj podhodnocovanie oboch modelov v nižších vegetačných pásmach, a naopak nadhodnocovanie údajov vo vyšších vegetačných pásmach.

Z vizuálnych diagramov, boxplotov, môžeme vidieť vo vyšších vegetačných pásmach symetrickejšie rozdelenie simulovaných údajov v porovnaní so simulovanými údajmi z nižších vegetačných pásiem, ktoré vernejšie zobrazujú rozdelenie pozorovaných hodnôt vodnej hodnoty snehu. Kvartilové rozpätie, jeho tvar, ako aj medián simulovaných údajov naznačujú uspokojivejšie modelovanie údajov vodnej hodnoty snehu pomocou Modelu 2 s modifikovanou optimalizačnou funkciou.

Vyskytujúce sa rozdiely v pozorovaných a modelovaných údajoch vodnej hodnoty snehu, najmä vo vyšších vegetačných pásmach nad 1400 m n. m. (subalpínske a alpínske vegetačné pásmo) mohli byť spôsobené napr. nedostatkom pozorovaných údajov, staníc spadajúcich do týchto nadmorských výšok, ako aj problematickým určením priemeru na vegetačné pásmo povodia v prípade výpadku meraní v niektorých staniách.

7 Použitá literatúra

BERGSTRÖM, S.: *Development and application of conceptual runoff model for Scandinavian catchments*. Norrköping: SMHI Reports RHO. 1976.

BERGSTRÖM, S.: *The HBV model - its structure and applications*. Norrköping: SMHI Reports RH. 1992, 4.

BOTANICKÝ ÚSTAV SLOVENSKEJ AKADÉMIE VIED:

http://ibot.sav.sk/Id_Key/Priloha%203%20-%20Vyskove%20stupne.pdf (2015-05-15)

DANKO, M., HLAVČOVÁ, K., KOHNOVÁ, S., SZOLGAY, J.: *Posúdenie extrémneho odtoku z topenia snehu v povodí Račianskeho potoka*. Acta Hydrologica Slovaca. 2010, 11, 1, Ústav Hydrológie Slovenskej akadémie vied, Bratislava. ISSN 1335-6291.

ISKANDAR, D., SUPRAPTO, Y.K., PURNAMA, I.K.: *Determination of priority parameter for classification of poverty using Chi-square method and Crammer's V correlation*. 2016 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (ISemantic), 2016, 247-252

KOSTKA, Z.: *Využitie snímok diaľkového prieskumu Zeme pri hydrologickom modelovaní v horských povodiach*. Acta Hydrologica Slovaca. 2000, 1, 2, Ústav Hydrológie Slovenskej akadémie vied, Bratislava. ISSN 1335-6291.

KOTRÍKOVÁ, K.: *Hodnotenie zmeny snehovej pokrývky na Slovensku v posledných desaťročiach*. Dizertačná práca. Stavebná fakulta v Bratislave, STU, Bratislava, 2018.

KRAJČÍ, P., KIRNBAUER, R., PARAJKA, J., SCHÖBER, J., BLÖSCHL, G.: *The Kúhtai data set: 25 years of lysimetric, snow pillow, and meteorological measurements*. Water Resources Research. 2017, 53, 6, s. 5158–5165, doi:10.1002/2017WR020445. ISSN 1573-1650. (2018-05-06)

KUBEŠ, R.: *Návrh koncepčného zrážkovo-odtokového modelu pre hydrologické predpovede*. Bratislava. 2007.

NIITTYNEN, P., LUOTO, M.: *The importance of snow in species distribution models of arctic vegetation*. *Ecography*. *Ecography*. 2017. <https://doi.org/10.1111/ecog.03348> (2018-03-15)

OREILLER, M., NADEAU, D. F., MINVILLE, M., ROUSSEAU, A. N.: *Modelling snow water equivalent and spring runoff in a boreal watershed, James Bay, Canada*. *Hydrological Processes*, 2013, 28, 25, 5991-6005. <https://doi.org/10.1002/hyp.10091>. ISSN:1099-1085. (2018-03-15)

PARAJKA, J.: *UEB EHZ – Distribuovaný energeticky založený model akumulácie a topenia snehovej pokrývky*. *Acta Hydrologica Slovaca*. 2001, 2, 2, Ústav Hydrológie Slovenskej akadémie vied, Bratislava. ISSN 1335-6291.

PECHO, J., LAPIN, M., FAŠKO, P., MIKULOVÁ, K.: *Long-term changes of snow cover characteristics regime in Slovakia*. EGU general Assambly 2009, 19-24 April 2009, Viedeň, Rakúsko. 2009.

PEKÁROVÁ, P., MIKLÁNEK, P.: *Predpoved' odtoku z topenia snehu z malého povodia*. *Acta Hydrologica Slovaca*. 2006, 7, 1, Ústav Hydrológie Slovenskej akadémie vied, Bratislava. ISSN 1335-6291.

SENAVIRATNE, G.M., UDAWATTA, R.P., BAFFAUT, C., ANDERSON, S.H.: *Evaluation of a stepwise, multiobjective, multivariable parameter optimization method for the APEX model*. *Journal of Environmental Quality*. 2014, 43, 4, 1381-1391, doi: 10.2134/jeq2013.12.0509. (2018-02-24)

STATSOFT, INC.: *Electronic Statistics Textbook*. Tulsa, OK: StatSoft., 1999, <http://www.statsoft.com/textbook/stathome.html>. (2018-10-03)

VALENT, P., DANEKOVÁ, J., RIVERSO, C.: *Neistoty pri kalibrácii zrážkovo-odtokového modelu HBV*. *Acta Hydrologica Slovaca*. 2011, 12, 2, Ústav Hydrológie Slovenskej akadémie vied, Bratislava. ISSN 1335-6291.

VALENT, P.: *Zrážkovo-odtokové modelovanie pre frekvenčnú analýzu prietokov*. Dizertačná práca. Stavebná fakulta v Bratislave, STU, Bratislava, 2014.

VÝLETA, R., KOTRÍKOVÁ, K., VALENT, P., SZOLGAY, J., SZÁSZ, V.: *Modelovanie vodnej hodnoty snehu v závislosti od priestorového delenia povodia v modeli*. *Acta hydrologica Slovaca*. 2015, 16, TC 1, 235-244.

WHICKHAM, H., STRYJEWSKI, L.: *40 years of boxplots*. Technical report, had.co.nz, 2012, 309-320

Jeséniová 17, 833 15 Bratislava

Assessment of the use of multicriterial optimization function in modelling of snow water equivalent

Katarína Kotříková

Collecting data of snow cover in our territory began in the middle of the 19th century and since the last third of the 20th century snow data from meteorological observations in our territory is regularly recorded and processed from a standard observation meteorological network. Accumulation of water in winter in form of snow cover and its subsequent melting in the spring, can have a negative effect like floods. Monitoring, processing, and the subsequent forecasting of the runoff situation are extremely important because of that. Just quick and quality information will help to eliminate possible damages caused by flood. In this paper, we lay stress on modelling of the snow water equivalent, and on highlighting the importance of preparing the input data, the correct calibration of the models, as well as the suitability of the rainfall-runoff model which will be used.

The modelled territory was the catchment area of the Upper Hron River, on this territory we can see the gradual increase of the average annual air temperature by up to 1.4 °C, as well as the slight decrease in rainfall and average annual flows during the last decades (1961 - 2010). The complexity of modelling the mountainous river basins led to the division of the catchment into a partial catchment areas based on the division of the territory of Slovakia according by the Institute of Botany of the Slovak Academy of Sciences into the vegetation highlands (hereinafter "vegetation zones"). There were used two modifications of the rainfall-runoff model Hron for modelling of snow water equivalent. Model 1 simulated snow water equivalent in individual vegetation zones based on semi-distributed inputs, the reliability of parameter calibration was considered by the consistency of simulated and measured average daily flows in basin's final catchment profile by the Nash-Sutcliffe coefficient. Model 2 has extended Nash-Sutcliffe optimization function by assessing the compliance of weekly measured and average weekly simulated snow water equivalent in each vegetation zones. Reliability of these models has been also compared with observed values of the snow water equivalent.

As statistical methods there were used the coefficient of correlation, the histogram of the deviation classes, and the graphical comparison using boxplots. Coefficients of correlation in lower vegetation zones (up to 1400 m a. s. l.) confirmed strong and very strong correlation of the variables in both models. In the higher vegetation zones (over 1400 m a. s. l.), the coefficient values correlated weakly, but in Model 2 the correlation of values was higher in comparison to Model 1, even in the subalpine vegetation zone (1400-1800 m a. s. l.) coefficients of correlation were reaching even a strong correlation of the variables.

Distribution to deviation classes shows that in the lower vegetation zones, a greater amount of simulated values from Model 2 belong to the lower classes of deviations. However, in higher vegetation zones, we can see that more than one third of the simulated data belongs to the highest class of deviations in both models. Histogram of the deviation classes also indicates underestimation of values in both models in the lower vegetation zones, and overestimation of data in higher vegetation zones.

From visual charts, boxplots, we can see a symmetrical distribution of simulated data in higher vegetation zones compared to simulated data from lower vegetation zones, which more faithfully show the distribution of observed data of the snow water equivalent. The interquartile range, its shape and the median of simulated data indicate a more satisfactory modelling of snow water equivalent by using Model 2 with a modified optimization function.

There may be a differences between observed and modelled data of snow water equivalent, especially in higher vegetation zones over 1400 m a. s. l. (subalpine and alpine vegetation zones), which could be caused, for example, by the lack of observed data, the stations belonging to this divided zone, as well

as by the problematic determination of the average value for the vegetation zone of the river basin in case of any failure in the measurements at stations.