OPTIMALIZÁCIA PARAMETROV HYDROLOGICKÉHO TRANSFORMAČNÉHO MODELU POMOCOU UMELÝCH NEURÓNOVÝCH SIETÍ

Peter Šúrek[1], *Ján Szolgay*[1]

Abstrakt

Hydrologické transformačné modely sú výkonné nástroje vodného hospodárstva, ktoré simulujú transformáciu povodňovej vlny. To umožňuje predpovedanie prietoku v nižšie položenom profile, ak je známy priebeh povodňovej vlny na vstupe do simulovaného riečneho úseku. Príspevok navrhuje nový spôsob simulácie transformácie povodňovej vlny multilineárnym modelom kaskády lineárnych nádrží (KLN). V mnohých prácach bolo preukázané, že súčin parametra *k*, ktorý má rozmer čas a počtu nádrží *n* je rovný hodnote postupovej doby, ktorá odzrkadľuje morfologické a hydraulické charakteristiky toku. Postupová doba je premenlivá, závislá na činiteľoch ako prietok, brehová vegetácia , ale aj tvar povodňovej vlny. V práci bol zostavený koncept, v ktorom je daný model parametrizovaný umelou neurónovou sieťou (UNS). Výstupom použitej UNS sú optimálne hodnoty parametra *k* modelu KLN. Analýza výsledkov transformácie ukázala, že navrhnutý koncept zatiaľ dosahuje lepšiu výkonnosť transformačného modelu KLN ako doterajšie parametrizácie.

Klíčová slova: riečny model, umelé neurónové siete, hybridný model, postupová doba

1. Úvod

V štúdii sa zaoberáme simuláciou transformácie povodňových vĺn v otvorených korytách, ktorú tu chápeme ako proces zmeny tvaru povodňovej vlny pri jej postupe určitým riečnym úsekom. Tento proces je pomerne dobre opísateľný matematickými modelmi, ktoré umožňujú napr. predpovedať povodňové prietoky v určitom riečnom profile. Takto zostavený systém umožňuje riadenie vodohospodárskych sústav v reálnom čase a zefektívňuje tak napr. výrobu elektrickej energie, ale uplatňuje sa i pri tvorbe protipovodňovej ochrany ako súčasť systému včasného varovania.

Postupová doba je dôležitým parametrom transformácie prietokovej vlny, ktorú tu definujeme ako čas, za ktorý postúpia charakteristické body povodňovej vlny (napr. vrcholy alebo ťažiská) riečnym úsekom. Morfologické a hydraulické charakteristiky simulovaného riečneho úseku a tvar prítoku sú premietnuté do postupovej doby transformovanej povodňovej vlny. Tak ako sa morfologické a hydraulické charakteristiky menia s výškou hladiny a teda aj s prietokom v koryte, mení sa aj hodnota postupovej doby.

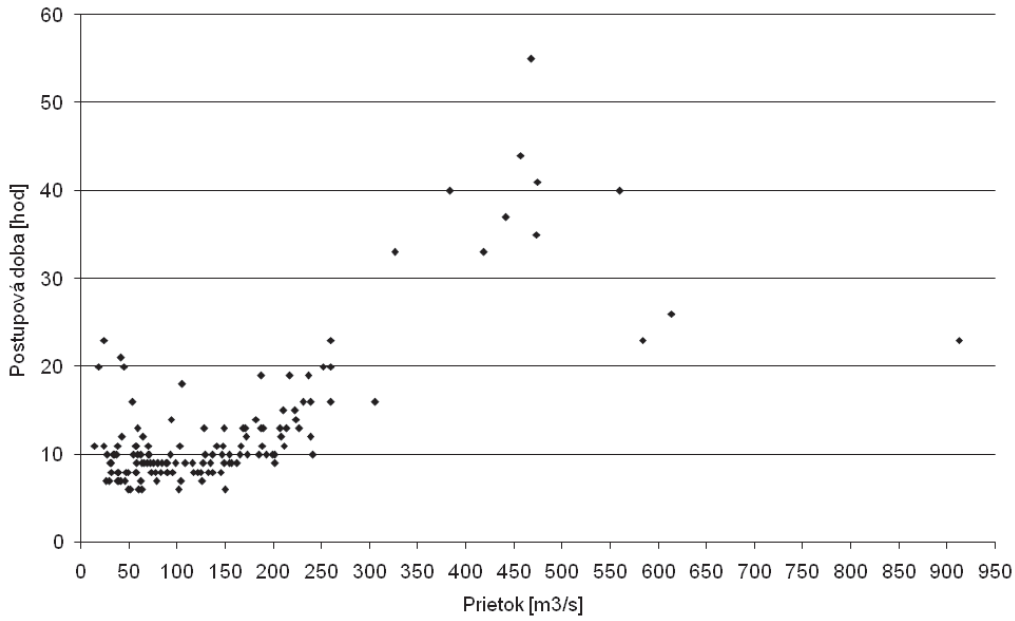
Prevrátenou hodnotou postupovej doby je celerita (rýchlosť postupu prietokovej vlny). Price [6] upozornil na závislosť celerity od prietoku. Všeobecný tvar tejto závislosti popísal ako dve mocninové funkcie spojené prechodovou krivkou v tvare S (Obr. 1).

Danáčová [1] analýzou postupových dôb prietokových vĺn potvrdila tvar závislosti opísaný Pricom [6] na rieke Morava (Obr. 2). Avšak pomerne veľký rozptyl bodov nás pri predpovedaní postupovej doby motivuje popri prietoku ako závislej premennej zohľadniť ďalšie faktory ako napr. vplyv bočných prítokov, sklon vodnej hladiny, alebo drsnosti koryta



Obr. 1: Všeobecný tvar závislosti celerity vlny (prevrátenej hodnoty postupovej doby) od prietoku opísaný v Price [6].

.

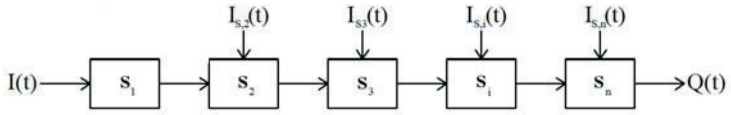


Obr. 2: Závislosť postupovej doby od prietoku na rieke Morava v úseku Moravský Svätý Ján – Záhorská Ves [1].

2. Transformačný model KLN

Na základe prístupu k popisu transformácie prietokových vĺn sa hydrologické modely rozdeľujú do dvoch kategórií: hydraulické a hydrologické. Hydraulický prístup detailne opisuje správanie sa transformácie prietokov v koryte toku pomocou parciálnych diferenciálnych rovníc. Tento prístup vyžaduje veľké množstvo vstupných údajov napr. opis geometrie toku. Parametre týchto modelov majú fyzikálny význam, môžu byť priamo merané alebo vypočítané, a teda parametrizácia modelu nevyžaduje údaje o správaní sa simulovaného úseku v minulosti. Hydrologický prístup je v kontraste s hydraulickým prístupom založený na štúdiu správaní modelovaného javu v minulosti. Parametre modelov nie sú väčšinou priamo merateľné, ale sa získavajú kalibráciou týchto modelov zo zodpovedajúcich si vstupných a výstupných radov historických údajov. Medzi najrozšírenejšie hydrologické modely patria metódy Muskingum a Kalin-Miljukov [3].

V tejto štúdii bol použitý hydrologický transformačný multilineárny model kaskády lineárnych nádrží (KLN), ktorý reprezentuje schéma na Obr. 3. Model KLN predstavuje rozšírenie pôvodného modelu Kalinina a Miljukova [3] o bočné prítoky do každej nádrže v kaskáde.



Obr. 3: Schéma modelu KLN, kde I(t) predstavuje vstupný prítok, $I_{s,i}(t)$ bočné prítoky, Q(t) výstupný prietok z modelu a S_i je stavová veličina reprezentujúca objem vody v i-tej nádrži kaskády.

Každá nádrž okrem prvej má prítok z predchádzajúcej nádrže. Vstup do modelu predstavuje hydrogram v hornom profile modelovaného úseku a výstup z kaskády je zároveň výstupom z riečneho úseku.

Stavové rovnice modelu boli odvodené ešte v práci Szolgay [7], kde sa vychádzalo z rovnice kontinuity a statickej relácie lineárnej nádrže. Odvodené stavové rovnice sú zapísané v tvare:

$$\overline{S}(a+1) = \overline{\Phi}(a+1,a)\,\overline{S}(a) + \overline{\Psi}(a+1,a)\,\overline{I}(a+1,a) \quad (1)$$

$$Q(a+1) = \overline{H}(a)\,\overline{S}(a+1) \quad (2)$$

kde $\overline{S}(a)$, $\overline{S}(a+1)$ je vektor objemov jednotlivých nádrží v časoch *a* , *a+1*.

Q(a+1) je výstup zo systému, matica H je v danom prípade vektor H = [0,0,0,... 1/k] dĺžky *n*, Φ a Ψ sú prechodové matice rozmeru *n* x *n*.

Parametrami modelu sú počet nádrží v kaskáde *n* a parameter *k*, ktoré boli v minulosti počas modelovania považované za konštantné. Kalinin a Miljukov [3] naznačili, že súčin *n* a *k* je úmerný hodnote postupovej doby. Použiteľnosť takto zostrojeného modelu pre rieky s premenlivou postupovou dobou je však obmedzená.

Premenlivosť postupovej doby je možné zohľadniť použitím princípov multilinearity, ktorý navrhol Kundzewicz [4]. Ide o kombináciu dvoch koncepcií, operátora na rozdelenie vstupného signálu do modelu na čiastkové signály a množinu lineárnych transformačných submodelov, ktoré sa podieľajú na transformácii vstupu na výstup zo systému. Nelineárny proces sa potom simuluje množinou lineárnych submodelov. V modeli KLN sa jednotlivé lineárne submodely líšia hodnotou parametra *k*. Túto hodnotu je možné viazať na ovplyvňujúce faktory tak, aby najlepšie vystihovali stav opisovaného javu. Takýto koncept bol použitý napr. aj v Szolgay [8] a Danáčová [2], kde multilineárny koncept modelu KLN bol identifikovaný závislosťou $k=f(Q_{in})$. Išlo o sériu lineárnych modelov, v ktorých sa parameter *k* menil v závislosti na prítoku. V kontraste s predchádzajúcimi prácami je v tejto štúdii multilineárny koncept modelu KLN parametrizovaný umelou neurónovou sieťou, ktorej výstup bol hodnota parametra *k*.

3. Metóda

V práci Danáčová [1] sa parameter *k* modelu KLN menil v závislosti na vstupnom prietoku do simulovaného úseku. Vplyv iných faktorov bol zanedbaný. V Šúrek [10], na ktorú nadväzuje súčasná štúdia, bol transformačný model parametrizovaný pomocou UNS, avšak práce sa líšia samotnými vstupmi do UNS. Vstupy do UNS použitej v tejto štúdii boli podrobne rozpísané v predchádzajúcej kapitole. UNS zo štúdie Šúrek [10] bola zostrojená pre nasledovné vstupy:prietok v profile do modelovaného úseku a rýchlosť nárastu prietoku transformovanej vlny.

Táto štúdia si dáva za cieľ zlepšiť parametrizáciu modelu zabudovaním umelej neurónovej siete (UNS) do transformačného modelu a zohľadnením ďalších podmieňujúcich činiteľov premenlivosti postupovej doby. UNS v modeli nahrádza doposiaľ používanú regresnú závislosť k=f(Q).

V práci je použitá viacvrstvová dopredná neurónová sieť (Feed Forward Neural Network, FFNN), ktorá je zložená z troch typov vrstiev, do ktorých sú neuróny zoskupované:vstupná, skrytá a výstupná vrstva. UNS bola natrénovaná tak, aby odhadovala pre rôzne prietokové stavy optimálnu hodnotu parametra *k*. UNS zohľadňovala vplyv sezóny v roku, vplyv bočných prítokov do simulovaného prítoku ako aj vplyv tvaru povodňovej vlny. Ako vstupy do UNS boli zvolené:

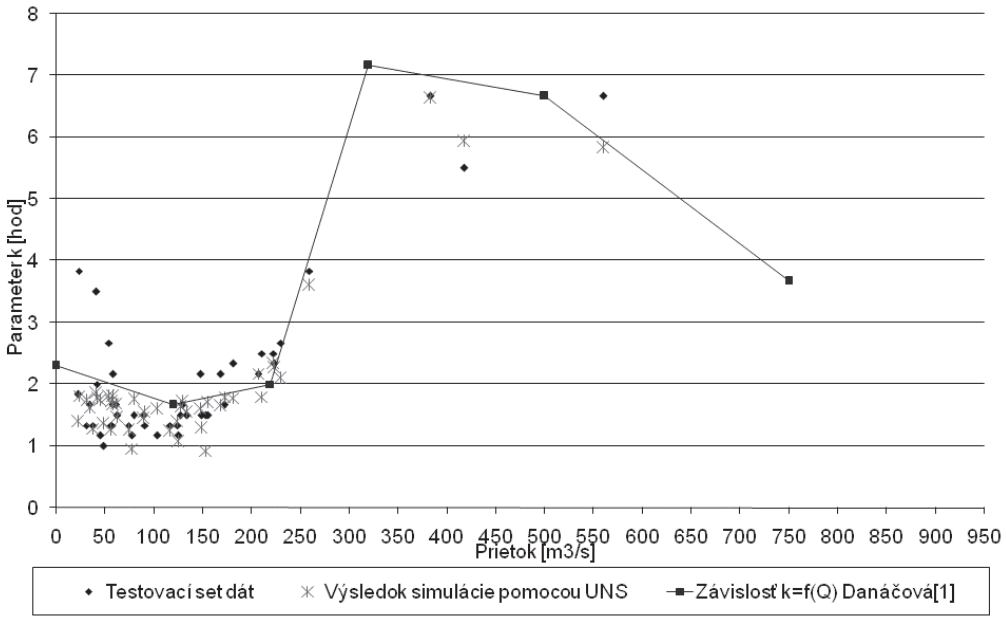
– údaje o prietoku na vstupnom profile do modelovaného úseku s niekoľko hodinovou históriou, aby mala UNS informáciu o tvare transformovanej vlne,

– údaje o prietoku na prítoku Zaya s niekoľko hodinovou históriou.

Na overenie funkčnosti navrhnutého konceptu boli použité hodinové údaje z riečneho úseku medzi vodomernými stanicami Moravský Svätý Ján – Záhorská Ves na toku Morava z obdobia 1992-2002. Rovnaké údaje boli použité v práci Danáčová [1]. To umožnilo porovnanie výkonnosti týchto dvoch koncepcií. Ako porovnávacie kritérium presnosti simulácie bol použitý Nash-Sutcliffov koeficient [5].

4. Prezentácia a analýza výsledkov

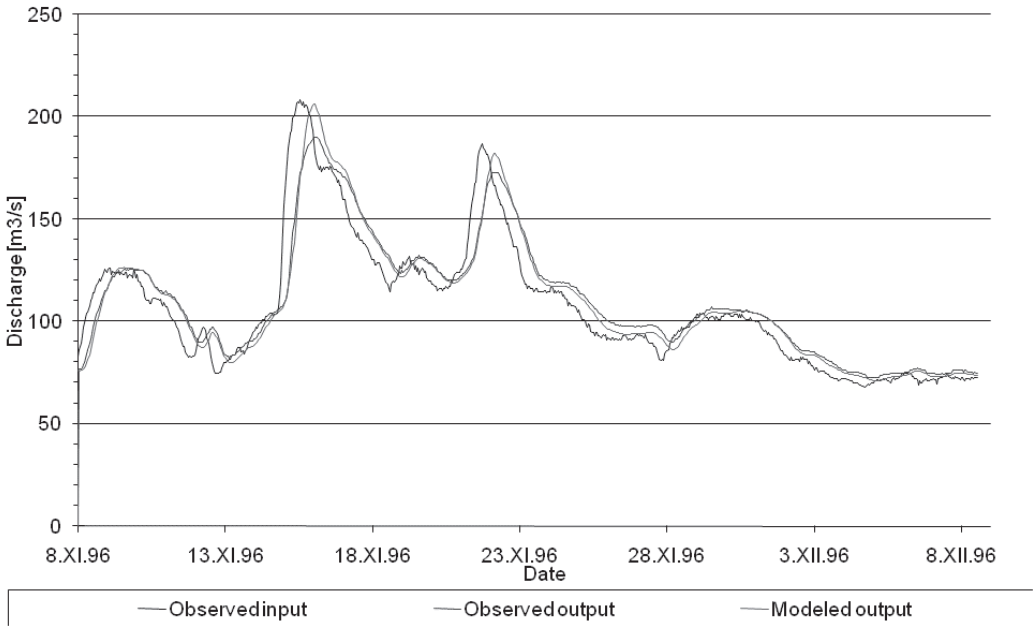
V prvej fáze bola zostrojená UNS, ktorej výstupom sú optimálne hodnoty parametra *k*.



Obr. 4: Výsledky validácie siete a porovnanie schopnosti siete vystihnúť postupovú dobu so reťazenou závislosťou, ktorá bola odhadnutá v práci Danáčová [1].

Sieť lepšie odhaduje hodnoty postupovej doby v porovnaním s regresnou závislosťou [1], kde je postupová doba viazaná iba na hodnoty prietokov. Pri predpovedaní postupovej doby s použitím UNS bola dosiahnutá hodnota kritéria strednej kvadratickej chyby MSE (Mean Squared Error) 10,02 $m^3.s^{-1}$, zatiaľ čo pri použití reťazenej závislosti bola hodnota MSE 13,13 $m^3.s^{-1}$.

Po procese učenia UNS, mohla byť následne sieť napojená na multilinéarny model.



Obr. 5: Priebeh verifikácie prietokovej vlny z obdobia od 8.11.1996-9.12.1996, pri použitý model KLN so vstavanou UNS. Nash-Sutcliffov koeficient dosiahol hodnotu 0, 978.

Tab. 1: Porovnanie dosiahnutých hodnôt Nash-Sutcliffových koeficientov s predchádzajúcimi prácami.

		Predchádzajúce práce		
Obdobie	Kulminácia [$m^3 s^{-1}$]	Dánačová [1]	Šúrek [10]	Súčastná práca
06.06.1992 - 19.06.1992	120,9	0,942	0,952	0,921
13.01.1993 - 14.02.1993	154,7	0,921	0,934	0,935
08.11.1996 - 09.12.1996	207,4	0,976	0,974	0,978
20.12.1995 - 06.01.1996	212,7	0,995	0,929	0,948
29.08.1995 - 13.09.1995	222,8	0,982	0,982	0,982
07.12.1993 - 01.03.1994	251,2	0,987	0,987	0,986
17.11.1991 - 19.11.1991	259,5	0,989	0,957	0,959
24.05.1994 - 06.06.1994	272,6	0,963	0,983	0,944
04.09.1996 - 09.11.1996	305,8	0,983	0,976	0,960
15.10.1998 - 05.12.1998	438,4	0,983	0,985	0,969
09.02.1997 - 18.03.1997	457	0,985	0,989	0,976
11.03.1993 - 06.05.1993	470,6	0,958	0,964	0,946
20.01.1992 - 27.04.1992	583,5	0,984	0,980	0,989
15.03.1996 - 12.06.1996	622,4	0,974	0,973	0,975
Priemer:		0,973	0,969	0,962

V Tab. 1 sú pre porovnanie uvedené získané hodnoty Nash-Sutcliffoveho koeficientu z predchádzajúcich prác Danáčová [1] a Šúrek [10].

Pri simulovaní transformácie povodňovej vlny dosahoval navrhnutý koncept pomerne vysokú presnosť. Avšak v porovnaní s prácou Danáčová [1] dosiahol horšie hodnoty Nash-Sutcliffových koeficientov.

5. Záver

V práci sa overovala použiteľnosť neurónových sietí na parametrizáciu riečneho transformačného modelu KLN.

Analýza výsledkov potvrdila, že UNS sú mimoriadne vhodné na predpovedanie samotnej postupovej doby prietokovej vlny (Obr. 4).

Navrhnutý koncept parametrizácie riečneho transformačného modelu KLN pomocou UNS nedosahoval presnosť simulácie modelu z predchádzajúcej práce Danáčová [1]. Autori článku predpokladajú, že celkový potenciál parametrizácie KLN pomocou UNS ešte nebol dostatočne využitý. Zlepšenie na riečnych úsekoch, kde model KLN parametrizovaný reťazenou závislosťou nedosahuje uspokojivé výsledky.

Spracovanie štúdie bolo podporené Agentúrou na podporu vedy a techniky prostredníctvom finančnej podpory č. APVV-0443-07 a APVV-0012-07.

Literatúra

[1] DANÁČOVÁ, M., 2005. Hodnotenie zmien transformácie vĺn na dolnej Morave. [Diplomová práca], Slovenská technická univerzita v Bratislave.

[2] DANÁČOVÁ, M. – SPÁL, P. – SZOLGAY, J., 2008. Analýza citlivosti multilineárneho transformačného modelu KLN na voľbu počtu nádrží a súčiniteľa lineárnej nadrže. Acta Hydrologica Slovaca, ročník 9, s. 24 – 38.

[3] KALININ, G.P. – MILJUKOV, P. L., 1957. O raschote neustanovivshegosya dvizhenia vodi v otkritich ruslach (in Russian). Meteorologia i gidrologia, 10, p. 10-18. Cited in: PEKAROVA, P. - SZOLGAY, J., 2005. Multilinearny model transformacie prietokov v korytach tokov. In: *Scenáre zmien vybraných zložiek hydrosféry a biosféry v povodí Hrona a Váhu v dôsledku klimatickej zmeny*. Bratislava, s. 203 – 252.

[4] KUNDZEWICZ, Z. W. – DOOGE, J. C. I., 1985. Unified structural approach to linear flood routing. Advances in Water Resources, 8(3), p. 37–42. Cited in: PEKAROVA, P. - SZOLGAY, J., 2005. Multilinearny model transformacie prietokov v korytach tokov. In: *Scenáre zmien vybraných zložiek hydrosféry a biosféry v povodí Hrona a Váhu v dôsledku klimatickej zmeny*. Bratislava, s. 203 – 252.

[5] NASH, J. E. – SUTCLIFFE, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10 (3), pp 282-290.

[6] PRICE, R. K., 1973. Flood routing methods for British rivers. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 55, pp 913–930.

[7] SZOLGAY, J., 1981. Adaptívne modely v hydrologických predpovediach. [PhD Thesis], Bratislava, UHH SAV, s. 130.

[8] SZOLGAY, J., 2003. Multilinear discrete cascade model for river flow routing and real time forecasting in river reaches with variable wave speed. In: *Assessment of the impacts of land–use and climate changes*. Proceedings of the ESF LESC Exploratory Workshop held at Bologna, October, pp 24 – 25.

[9] ŠÚREK, P., 2008. Calibration of a hydrological routing model by Genetic Algorithm. [Diplomová práca], Cranfield University.

[10] ŠÚREK, P., 2009. Parametrizácia hydrologického transformačného modelu neurónovou sieťou. Acta Hydrologica Slovaca, ročník 10.

Kontakty na autora

1 Katedra vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Radlinského 11, 83102 Bratislava, Slovenská Republika, e-mail: peter.surek@stuba.sk, jan.szolgay@stuba.sk