

# TRANSFORMÁCIA POVODŇOVEJ VLNY HYBRIDNÝM HYDROLOGICKÝM MODELOM V PROSTREDÍ MATLAB

*P. Šúrek, R. Výleta, J. Szolgay*

Katedra vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta STU v Bratislave

## Abstrakt

V práci sa zaoberáme simuláciou transformácie povodňových vln v otvorených korytách, ktoré definujeme ako proces zmeny tvaru povodňovej vlny pri jej postupe určitým riečnym úsekom. Proces transformácie je pomerne dobre opísateľný matematickými modelmi. Ich praktické využitie spočíva v predpovedaní povodňových prietokov v určitom riečnom profile, čo umožňuje riadenie vodohospodárskych sústav v reálnom čase. Uplatňujú sa aj pri tvorbe protipovodňovej ochrany ako súčasť systému včasného varovania.

Matematické modely transformácie povodňovej vlny v koryte toku rozdeľujeme na hydraulické a hydrologické. Hydraulické modely detailne opisujú správanie sa transformácie prietokov v koryte toku pomocou parciálnych diferenciálnych rovníc. Vyžadujú veľké množstvo vstupných údajov (ako napr. opis geometrie koryta a drsnosti toku). Parametre týchto modelov majú fyzikálny význam. Môžu byť priamo merané alebo vypočítané, a teda zostavenie modelov nevyžaduje údaje o správaní sa simulovaného úseku v minulosti. Hydrologické modely sú v kontraste s hydraulickými založené na napodobňovaní správaní sa systému v minulosti. Parametre modelov nie sú väčšinou priamo merateľné, ale získavajú sa kalibráciou týchto modelov zo zodpovedajúcich si vstupných a výstupných hydrogramov. Jeden z najrozšírenejších hydrologických modelov u nás je multilineárny model kaskády lineárnych nádrží (KLN).

Model KLN bol v tejto štúdii parametrizovaný pomocou neurónových sietí (UNS). Výstupom použitej UNS sú optimálne hodnoty parametrov modelu KLN zohľadňujúc rôzne odtokové stavy. V práci bola použitá dopredná neurónová sieť, ktorá v procese učenia využíva metódu spätného šírenia chýb (feed-forward backpropagation). Na riešenie daného problému bolo použité programové prostredie MATLAB.

Navrhnutý hybridný koncept, v ktorom bol riečny transformačný model KLN parametrizovaný pomocou UNS, v porovnaní s KLN modelmi kalibrovanými pomocou genetického algoritmu dosahoval vyššiu presnosť simulácie, čo nás motivuje overiť navrhnutý koncept aj na iných riečnych úsekoch.

## 1. Úvod

Naším dlhodobým cieľom je zvýšenie presnosti simulácie transformácie povodňových vln v otvorených korytách. Transformáciu chápeme ako proces zmeny tvaru povodňovej vlny pri jej postupe určitým riečnym úsekom, ktorý je pomerne dobre opísateľný matematickými modelmi. Pomocou nich je možné predpovedať povodňové prietoky v určitom riečnom profile, čo umožňuje riadenie vodohospodárskych sústav v reálnom čase. Uplatňujú sa i pri tvorbe protipovodňovej ochrany ako súčasť systému včasného varovania.

Dôležitým parametrom transformácie prietokovej vlny je postupová doba, ktorá je definovaná ako čas, za ktorý postúpia charakteristické body povodňovej vlny (napr. vrcholy alebo medzivrcholy)

riečnym úsekom. Do postupovej doby transformovanej povodňovej vlny sú premietnuté morfológické a hydraulické charakteristiky simulovaného riečného úseku a tvar prietokovej vlny na prítoku.

Komplexné procesy, ako sú zrážky a povodne, by bolo možné lepšie modelovať a predpovedať dekompozíciou problému na komponentné procesy. Pritom sa využívajú fyzikálna podstata procesov a údajovo založené nástroje, modely časových radov alebo tradičné štatistické metódy (Ganguly a Bras, 2001). Pre takýto prístup zaviedli Ganguly a Bras (2001) názov hybridný. V princípe sa jedná o kombinovaný deterministicko–stochastický modelovací prístup. Modelovanie takýmto hybridným prístupom zohľadňujúcim množstvo rozličných hľadísk, si vyžaduje aj vhodné údajovo založené predpovedné metódy, ktoré berú do úvahy nelinearitu modelovaných procesov. Takéto hybridné modely sa používajú aj v iných oblastiach predpovedania a optimalizácie (napr. riešenie optimalizačných problémov (Reyes-Aldasoro, 1999)). Cieľom tejto štúdie bolo skĺbiť dva rôzne modelovacie prístupy v rámci hybridného modelovania to koncepčný riečny model kaskády lineárnych nádrží (KLN) a umelých neurónových sietí (UNS).

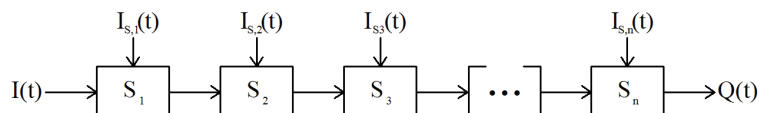
V štúdií sú prezentované a porovnané výsledky z práce Šúrek (2009), v ktorej sa skĺbili dva rôzne prístupy v rámci hybridného modelovania a to koncepčného multilineárneho modelu KLN a dátami riadené modely akými sú UNS. V rámci hybridného modelovania boli neurónové siete použité napr. v Taskaya-Temizel (2005). Princíp navrhnutý v Šúrek (2009) bol inovatívny spôsob použitia UNS ako simulátora parametrov modelu v reálnom čase. Výstupom použitej UNS boli optimálne hodnoty parametrov modelu KLN zohľadňujúc odtokové stavy počas transformácie prietokovej vlny. Na riešenie daného problému bol použitý Neural Network Toolbox ako nástroj programového prostredia MATLAB.

## **2. Hydrologický riečny model kaskády lineárnych nádrží (KLN)**

Hydrologické riečne modely sú numerické metódy, ktoré napodobňujú transformáciu prietokovej vlny medzi dvomi riečnymi profilmi. Rozdeľujeme ich do dvoch hlavných kategórií: hydrologické a hydraulické modely.

Hydraulické modely detailne opisujú prúdenie vody v koryte toku pomocou parciálnych diferenciálnych rovníc, ktoré vyžadujú veľké množstvo parametrov modelu ako opis geometrie koryta a drsnosti riečného úseku. Tieto údaje môžu byť priamo merané alebo odhadnuté. Ich získavanie je však časovo aj finančne veľmi náročné. Hydrologické modely sú v kontraste s hydraulickými založené na štúdiu správania sa modelovaného javu v minulosti. Parametre takýchto modelov zvyčajne nie sú merateľné, ale získavajú sa kalibráciou modelov zo zodpovedajúcich si vstupných a výstupných radov historických údajov riečného modelovaného úseku. Medzi najrozšírenejšie hydrologické modely patria metódy Muskingum a Kalin-Miljukov (Kalinin-Miljukov, 1957).

V tejto štúdií bol použitý hydrologický transformačný multilineárny model, ktorý vychádza z pôvodného konceptu modelu kaskády lineárnych nádrží (KLN) podľa Kalinina a Miljukova (Kalinin-Miljukov, 1957). Riečne koryto sa modeluje pomocou série lineárnych nádrží. Model reprezentuje schéma na obr.1, kde má každá nádrž (okrem prvej) prítok z predchádzajúcej nádrže. Vstup do modelu  $I(t)$  predstavuje prítok na hornom profile modelovaného úseku, ktorý je spolu s bočnými prítokmi konštantný počas celého vzorkovacieho intervalu  $(a, a+1)$  o dĺžke  $T$ . Výstup z kaskády  $Q(t)$  je zároveň výstup z riečného úseku.



Obr.1. Schéma modelu KLN, kde  $I(t)$  predstavuje vstupný prítok,  $I_{s,i(t)}$  bočné prítoky,  $Q(t)$  výstupný prítok z modelu a  $S_i$  je stavová veličina reprezentujúca objem vody v  $i$ -tej lineárnej nádrži kaskády.

Stavové rovnice modelu boli odvodené v práci Szolgay (1981), kde sa vychádzalo z rovnice kontinuity a statickej relácie lineárnej nádrže. Odvodené stavové rovnice sú zapísané v tvare:

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

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

kde  $\bar{S}(a)$ ,  $\bar{S}(a+1)$  sú vektory objemov jednotlivých nádrží v časoch  $a$ ,  $a+1$ .  $Q(a+1)$  je výstup zo systému, matica  $\bar{H}$  je v danom prípade vektor  $\bar{H} = [0, 0, 0, \dots, 1/k]$ , kde  $k$  je časová konštanta lineárnej nádrže.

Pre prvky prechodových matic  $\Phi$ ,  $\Psi$  za predpokladu konštantných vstupov v intervale  $\langle a, a+1 \rangle$  platí :

Pre  $i \geq j$

$$\Phi(i, j) = \frac{T^i}{(i-j)!} \frac{e^{-T/k}}{k^j} \quad (3)$$

$$\Psi(i, j) = k - \sum_{f=0}^{i-j} \frac{T^f \cdot e^{-T/k}}{f! k^{f+1}} \quad (4)$$

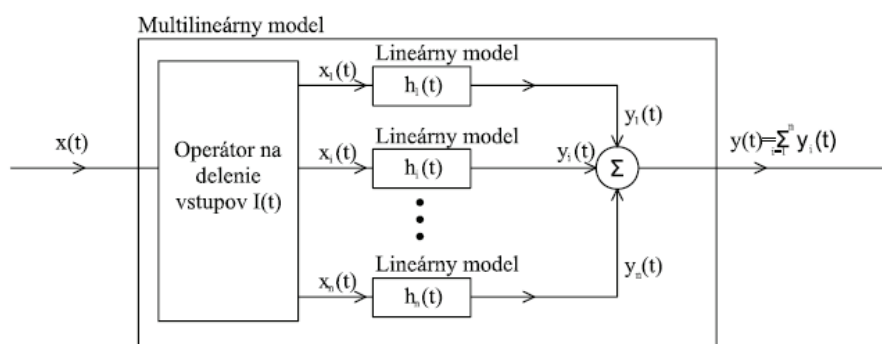
Inak

$$\Phi(i, j) = 0 \quad (5)$$

$$\Psi(i, j) = 0 \quad (6)$$

Parametrami modelu sú počet nádrží v kaskáde  $n$  a parameter  $k$ , ktoré boli v minulosti počas modelovania považované za konštantné. Avšak morfológické a hydraulické charakteristiky koryta vyjadrené parametrami modelu sú premenlivé v závislosti na vodnom stave. Preto je použiteľnosť modelu s konštantnými parametrami obmedzená.

Premenlivosť postupovej doby je možné zohľadniť použitím princípov multilinearity, ktorý pre hydrologické modelovanie navrhol Kundzewicz (1985) (Obr.2). Ide o kombináciu dvoch koncepcií a to 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.



Obr.2. Základná schéma multilinearity, ktorú navrhol Kundzewicz (1985).

Nelineárny proces transformácie odtoku v riečnej sieti sa pri uplatnení princípov multilinearity simuluje množinou lineárnych submodelov. V multilineárnom modeli KLN je použité tzv. časové delenie vstupného signálu, prítoku. Jednotlivé lineárne submodely sa líšia hodnotou parametra  $k$  v každom časovom kroku. Hodnotu  $k$  je možné viazať na ovplyvňujúce faktory tak, aby model v každom časovom kroku čo najlepšie vystihoval modelovaný proces.

### 3. Porovnanie výsledkov simulácie prietokových vln pomocou modelu KLN

V tejto štúdií porovnáваме výkonnosť simulácie hybridného modelu KLN parametrizovaného pomocou UNS (Šúrek,2009) s výsledkami predchádzajúcich prác Danáčová (2005), Šúrek (2006), Šúrek (2008).

V Danáčová (2005) bol model parametrizovaný po častiach lineárnym vzťahom  $k = f(I)$ . Riečny úsek sa modeloval kaskádou  $n$  rovnakých lineárnych nádrží zapojených v sérii s parametrom  $k$ , ktorý sa menil v závislosti na prítoku. Vplyv bočného prítoku a príbrežnej vegetácie bol zanedbaný. Ako indikátor

tvaru hľadanej závislosti boli použité body postupovej doby vrcholov v závislosti od vstupných prítokov do modelovaného úseku. Optimálna závislosť sa hľadala pomocou metódy pokus-omyl.

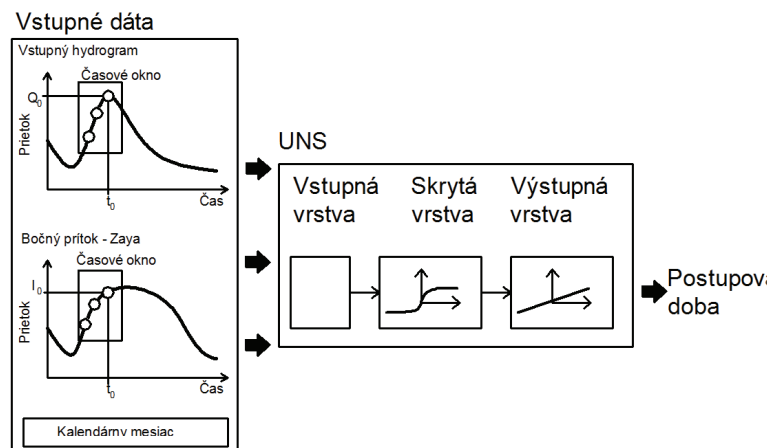
Šúrek (2006) optimalizoval tvar závislosti  $k = f(I)$  pomocou GA. Vzťah považoval za po častiach lineárnu funkciu, pričom počet úsečiek bol počas modelovanie konštantný a ich dĺžka rovnaká. Optimalizačným kritériom bola zhoda medzi výstupným prietokom z modelu a odpovedajúcim pozorovaným prietokom vo výstupnom profile z modelovaného úseku. Táto zhoda bola vyjadrená Nash-Suctliffovým koeficientom (pozri rovnicu 7).

V Šúrek (2008) v kontraste so štúdiou Šúrek (2006) použil flexibilnejší tvar závislosti  $k=f(I)$  optimalizovaný taktiež pomocou GA. Závislosť bola zostrojená z reťazených vektorov nerovnej dĺžky. V práci sa vyšetroval aj optimálny počet vektorov v závislosti.

V štúdi Šúrek (2009) bol multilineárny koncept modelu KLN parametrizovaný pomocou UNS, ktorá v modeli nahradila doposiaľ používanú regresnú závislosť  $k=f(I)$ . Bola použitá dopredná neurónová sieť, ktorá bola natrénovaná tak, aby odhadovala pre rôzne prietokové stavy optimálnu hodnotu parametra  $k$ . Zohľadňovala vplyv sezónnosti v roku, vplyv bočných prítokov do simulovaného prítoku ako aj vplyv tvaru povodňovej vlny. UNS ako vstup používa :

- údaje o prietoku na vstupnom profile do modelovaného úseku s niekoľko hodinovou históriou, aby mala UNS informáciu o tvare transformovanej vlny,
- údaje o prietoku na prítoku Zaya s niekoľko hodinovou históriou, aby mala UNS informáciu o tvare povodňovej vlny,
- poradové číslo kalendárneho mesiaca, čo umožnilo zahrnúť vplyv príbrežnej vegetácie.

Štruktúra vstupov je znázornená na obr. 3.



Obr.3. Štruktúra vstupov do zostavenej UNS siete.

Presnosť simulácie hybridného modelu (Šúrek,2009) bola porovnávaná s predchádzajúcimi prácami Danáčová (2005), Šúrek (2006) a Šúrek (2008). Ako porovnávacie kritérium bol použitý Nash-Sutcliffov koeficient (Nash, 1970). Získané hodnoty Nash-Sutcliffových koeficientov z vyššie uvedených predchádzajúcich prác sú v tab.1.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{o(t)} - Q_{m(t)})^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{o(t)} - \overline{Q_o})^2} \quad (7)$$

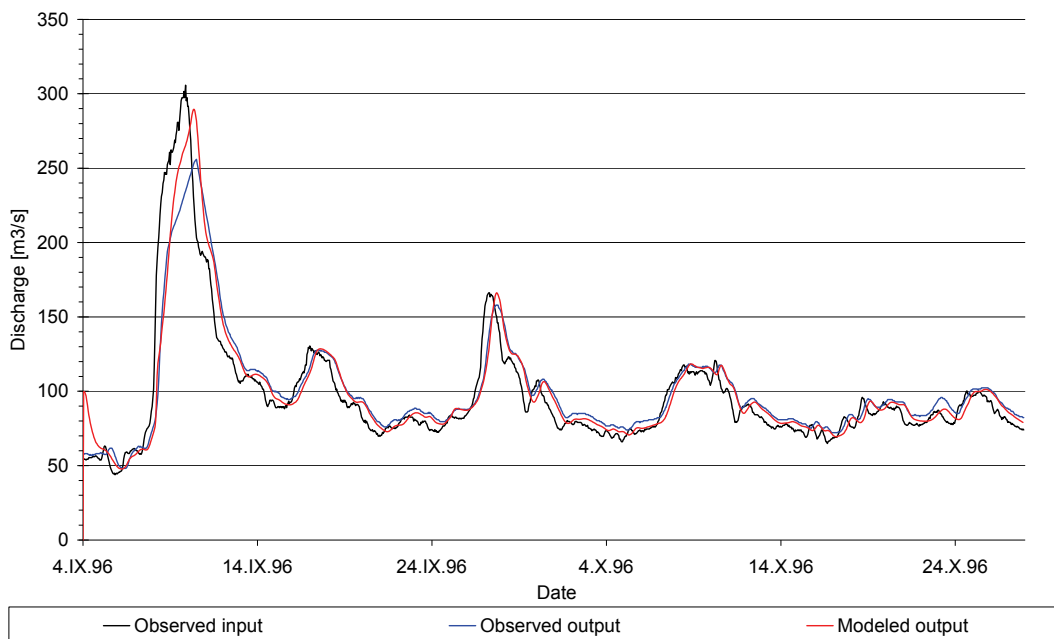
kde  $\overline{Q_o}$  je aritmetický priemer meraných prietokov,  $Q_{o(t)}$  je meraný prietok a  $Q_{m(t)}$  je simulovaný prietok.

Na porovnanie presnosti simulácie hybridného modelu KLN boli použité hodinové údaje z riečného úseku toku Morava medzi vodomernými stanicami Moravský Svätý Ján – Záhorská Ves z obdobia 1992-2002. Boli získané z archívov SHMÚ. Rovnaké údaje boli použité v prácach Danáčová (2005), Šúrek (2006) a Šúrek (2008). Súčasťou riečného úseku sú dva významné prítoky Rudava a Zaya, pomocou ktorých boli hydrologickou analógiou odhadnuté údaje o bočnom prítoku.

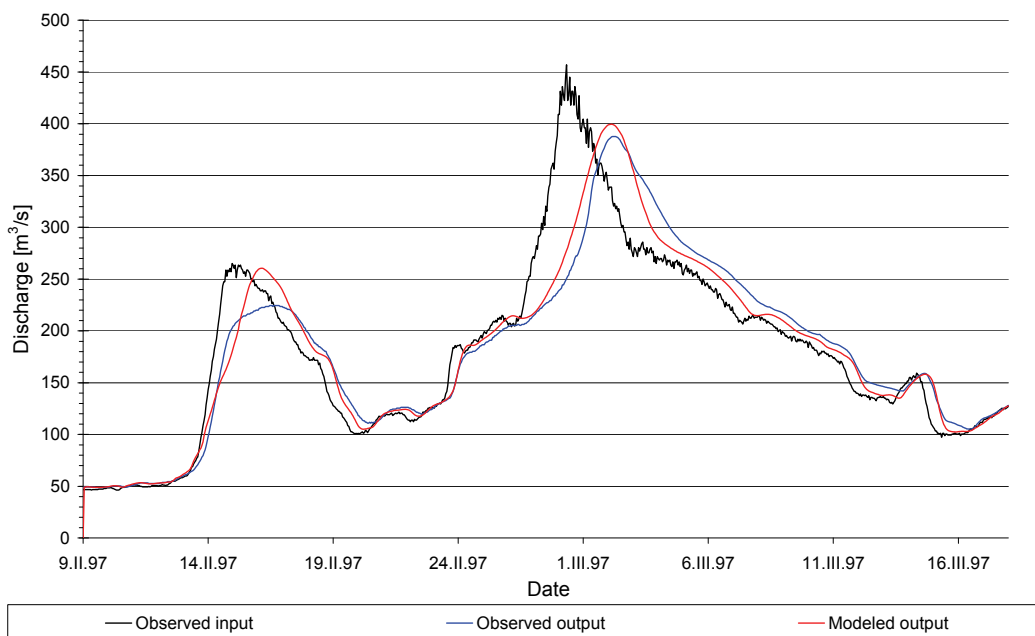
Tab.1. Porovnanie dosiahnutých hodnôt Nash-Sutcliffových koeficientov s predchádzajúcimi prácami.

Obdobie	Predchádzajúce práce				Súčasná štúdia
	Optimálny lineárny model KLN	Model KLN kalibrovaný manuálnou kalibráciou (Danacova,2005)	Model KLN kalibrovaný pomocou GA (Šúrek, 2006)	Model KLN kalibrovaný pomocou GA (Šúrek, 2008)	
06.06.1992 - 19.06.1992	0,919	0,942	0,3788	0,952	0,921
13.01.1993 - 14.02.1993	0,937	0,921	0,7706	0,934	0,935
08.11.1996 - 09.12.1996	0,976	0,976	0,8613	0,974	0,978
20.12.1995 - 06.01.1996	0,933	0,995	0,8584	0,929	0,948
29.08.1995 - 13.09.1995	0,980	0,982	0,7969	0,982	0,982
07.12.1993 - 01.03.1994	0,985	0,987	0,9687	0,987	0,986
17.11.1991 - 19.11.1991	0,972	0,989	0,8405	0,957	0,959
24.05.1994 - 06.06.1994	0,929	0,963	0,7857	0,983	0,944
04.09.1996 - 09.11.1996	0,950	0,983	0,7698	0,976	0,96
15.10.1998 - 05.12.1998	0,971	0,983	0,9759	0,985	0,969
09.02.1997 - 18.03.1997	0,925	0,985	0,9616	0,989	0,976
11.03.1993 - 06.05.1993	0,941	0,958	0,9446	0,964	0,946
20.01.1992 - 27.04.1992	0,975	0,984	0,9698	0,98	0,989
15.03.1996 - 12.06.1996	0,984	0,974	0,9751	0,973	0,975
Priemer:	0,956	0,973	0,847	0,969	0,962

Pre vizuálnu kontrolu sú na obr.4 a obr.5 prezentované výsledky transformácie hybridného modelu KLN parametrizovaného pomocou UNS.



Obr.4. Priebieh verifikácie prietokovej vlny z obdobia od 4.9.1996-9.11.1996, pri použití model KLN so vstavanou UNS. Nash-Sutcliffov koeficient dosiahol hodnotu 0,960.



Obr.5. Priebieh verifikácie prietokovej vlny z obdobia od 9.2.1997-18.3.1997, pri použití model KLN so vstavanou UNS. Nash-Sutcliffov koeficient dosiahol hodnotu 0,976.

## Záver

V štúdiu boli porovnané výsledky simulácie z hybridného konceptu, v ktorom bola UNS použitá ako simulátor parametra  $k$  modelu KLN. Z porovnaní Nash-Sutcliffových koeficientov však vyplýva, že navrhnutý koncept parametrizácie riečneho transformačného modelu KLN pomocou UNS nedosahoval takú presnosť simulácie modelu ako v predchádzajúcich prácach Danáčová (2005) a Šúrek (2008). Môže to byť spôsobené faktom, že predchádzajúce práce optimalizovali závislosť  $k=f(I)$  priamo cez model KLN a ako optimalizačné kritérium bol použitý Nash-Sutcliffov koeficient, zatiaľ čo súčasná štúdia ho použila iba ako indikátor presnosti simulácie. Keďže vysoká výkonnosť modelu podľa subjektívneho hodnotenia nemusí nutne viesť k dobrým hodnotám Nash-Sutcliffových koeficientov, strohé porovnávanie Nash-Sutcliffových koeficientov nemusí byť objektívne.

Optimálny lineárny model KLN nedosahuje presnosť simulácie hybridného modelu KLN, čo nás utvrdzuje o význame zapojenia princípu multilinearity do transformačného modelu KLN:

Autori článku predpokladajú, že celkový potenciál parametrizácie KLN pomocou UNS ešte nebol dostatočne využitý. Zlepšenie na riečnych úsekoch, kde bol model KLN parametrizovaný reťazenou závislosťou nedosahuje uspokojivé výsledky. Ďalšie spresnenie simulácie hybridného konceptu modelu KLN by mohla viesť cez optimalizáciu UNS, na ktorú je model napojený, pomocou GA. Optimalizoval by sa tak hybridný model ako celok.



## Referencie

Danáčová, M. (2005): Hodnotenie zmien transformácie vln na dolnej Morave. Diplomová práca, Slovenská technická univerzita v Bratislave.

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, č.1, 2008, 24-38.

Gaugly, A.R., Bras, R. L. (2001): Distributed Quantitative Precipitation Forecasting Combining Radar and NWP. 7th Int. Precipitation Conference, Rockport, Maine, USA.

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. p. 203 – 252.

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. p. 203 – 252.

Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, Journal of Hydrology, 10 (3), p. 282-290.

Suchár, M. , Čistý, M. (2008): Využitie viacvrstvového perceptrónu v predpovedi prietokov. In: Transport vody, chemikálií a energie v systéme pôda-rastlina-atmosféra: 16. Posterový deň s medzinárodnou účasťou a Deň otvorených dverí na ÚH SAV. Bratislava, SR, 13.11.2008: ÚH SAV, 2008. - ISBN 978-80-89139-16-3. 9s

Szolgay, J. (1981): Adaptívne modely v hydrologických predpovediach. PhD Thesis, Bratislava, UHH SAV, p. 130.

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 climatechanges. Proceedings of the ESF LESC Exploratory Workshop held at Bologna, October 24–25.

Šúrek, P. (2006): Transformácia prietokových vln korytom toku multilineárnym modelom kaskády lineárných nádrží. Bakalárska práca, Stavebná fakulta, STU, Bratislava.

Šúrek, P. (2008): Calibration of a hydrological routing model by Genetic Algorithm. Diplomová práca, Cranfield University.

Šúrek, P. (2009): Parametrizácia hydrologického transformačného modelu neurónovou sieťou. . Acta Hydrologica Slovaca. Ročník 10, č. 1, 2009.

Reyes-Aldasoro, C. C., Ganguly, A. R., Lemus, G., Gupta, A., (1999): A hybrid model based on dynamic programming, neural networks, and surrogate value for inventory optimisation applications., Journal of the Operational Research Society. 50(1).

Taskaya-Temizel, T., Casey, M. C. (2005): A comparative study of autoregressive neural network hybrids. Neural Networks, Volume 18, Issues 5-6, s. 781-789.

---

Peter Šúrek  
[peter.surek@stuba.sk](mailto:peter.surek@stuba.sk)

Roman Výleta  
[roman.vyleta@stuba.sk](mailto:roman.vyleta@stuba.sk)

Ján Szolgay  
[jan.szolgay@stuba.sk](mailto:jan.szolgay@stuba.sk)

Katedra vodného hospodárstva krajiny  
Stavebná fakulta STU  
Bratislava