

# EXTRAPOLACE INTENZITNÍCH KŘIVEK PRO ÚČELY MODELOVÁNÍ SRÁŽKOODTOKOVÉHO PROCESU

P. Ježík

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny, Žižkova 17,  
602 00 Brno

## Abstrakt

Obsah příspěvku popisuje zpracování základních srážkových dat a jejich rozšíření do požadovaného rozsahu. Pro popis srážkových dat jsou používány tzv. intenzitní křivky zobrazující vzájemný vztah intenzity deště a jeho doby trvání. V příspěvku je popsán způsob extrapolace těchto křivek do požadovaných oblastí. Postupná extrapolace probíhá ve dvou základních krocích, kdy je nejprve potřeba určit závislosti pro vybrané stanice pro větší doby opakování, než pro jaké jsou data k dispozici. V další fázi jsou pak nově získané intenzitní křivky pro požadované doby opakování extrapolovány do oblastí větších dob trvání deště. V druhé části příspěvku je ve stručnosti popsána aplikace těchto rozšířených dat pro výpočet odtokové reakce malého povodí po dopadu přívalové srážky.

## 1 Úvod

Pro účely modelování srážkooodtokového procesu v hydrologii je potřeba mít dostatečné množství vzorových dat pro kalibraci modelu. Otázka, kde taková data získat a jak ověřit jejich dostatečnou věrohodnost pro spolehlivé použití modelu po kalibraci, je složitá. Předně je většina těchto dat zatížena poměrně velkým množstvím neurčitostí. Model, pro jehož užití jsou užitá data v tomto příspěvku popsána, pracuje s parametry příčinného deště, veličinami popisujícími geografické vlastnosti povodí, případně s doplňujícími charakteristikami sledovaných povodí. Ze zadaných vstupních dat pak model vyhodnocuje očekávanou odtokovou reakci povodí, a to skrze výstupní hodnotu kulminačního průtoku povodňového hydrogramu. Tato hodnota může být následně porovnávána s hodnotami limitních průtoků, které již v daném povodí způsobí problémy, případně škody.

Pro popis charakteru příčinného deště jsou používány tzv. intenzitní křivky, které určují vztah doby trvání deště a jeho intenzity. Křivky jsou vykresleny v několika variantách, přičemž se liší svou periodicitou, tedy převrácenou hodnotu průměrné dlouhodobé doby opakování dané dešťové události. Tento soubor dat je vyhodnocován z dlouhodobého měření ve srážkoměrných stanicích. Hlavní a vlastně dodnes nejpoužívanější datový soubor, který poskytuje podklady pro vykreslení intenzitních křivek pro 96 stanic na území České republiky, sestavil v roce 1958 Ing. Josef Trupl – tzv. Truplovy tabulky [1]. Zde je také uveden popis metodiky zpracování srážkových dat. Truplovy tabulky dodnes slouží jako relevantní podklad pro projekční praxi v oblasti vodního hospodářství.

Kalibrace výše zmíněného modelu vyžaduje sestavení matice vzorových dat, která musí mít takový tvar, jaký určuje struktura modelu. Počet řádků této matice je dán počtem vzorových dešťových epizod, přičemž s rostoucím počtem těchto epizod roste i spolehlivost kalibračního procesu. Počet sloupců je pak dán počtem vstupních/výstupních veličin, se kterými model pracuje. Obsah příspěvku přibližuje konstrukci matice vzorových dat – rozšíření podkladů, které je možno získat z Truplových tabulek do požadovaného rozmezí, protože Trupl vyhodnocuje dešťové události pouze do dob trvání 120 min (což je nedostačující) a do dob opakování 20 let, resp. 25 let (což je rovněž nedostačující).

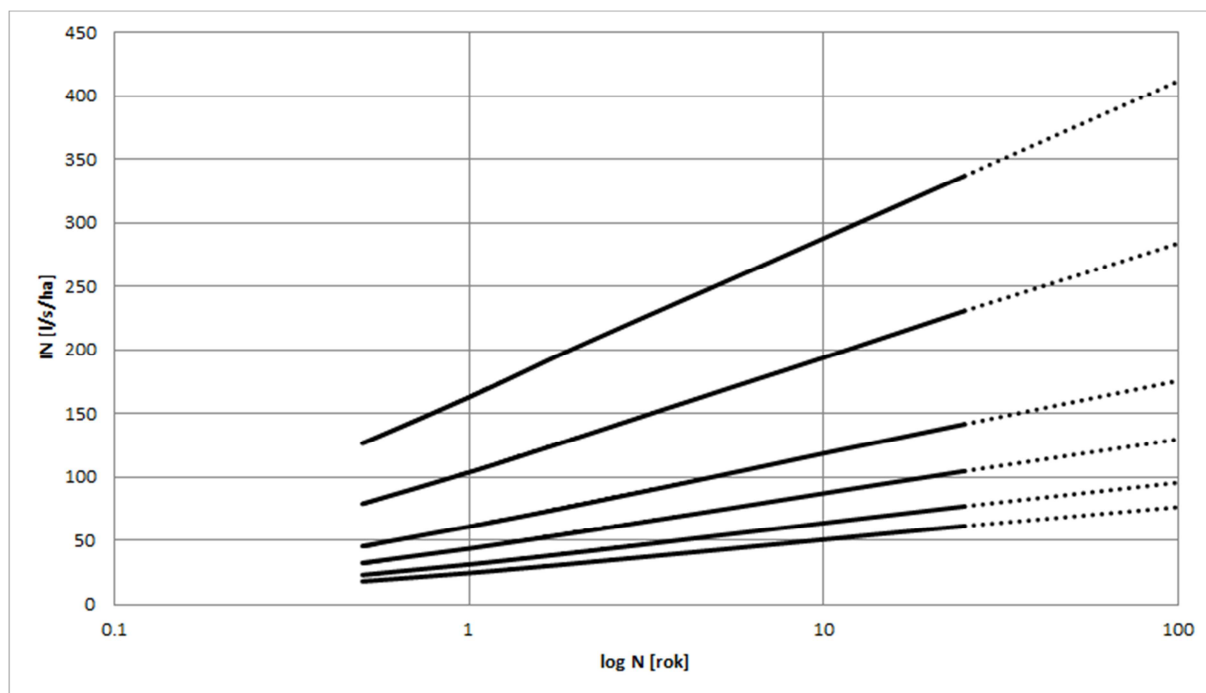
## 2 Extrapolace a sestavení matice vzorových dat

Matice vzorových dat představuje soubor vstupních a výstupních hodnot, které slouží pro kalibraci modelu. Matice obsahuje sloupce reprezentující vlastnosti povodí (plocha, sklonitost, lesnatost, hodnota specifického odtoku z povodí v místě uzávěrového profilu povodí a průměrná hodnota CN pro povodí). Další sloupce představují parametry příčinného deště – doba trvání a intenzita. V posledním sloupci je pak výstupní hodnota kulminačního průtoku  $Q$ . Počet řádků matice vzorových dat je roven počtu povodí, která byla do této matice zahrnuta.

Matice obsahuje 251 povodí z celé České republiky, přičemž naprostá většina z nich leží v oblasti místní působnosti brněnské pobočky Českého hydrometeorologického ústavu. Pro odvozenou hodnotu doby trvání příčinné srážky bylo potřeba určit intenzitu. V této fázi bylo potřeba vyřešit několik dílčích problémů. Pro požadované stanice byly většinou k dispozici údaje o intenzitách pouze pro nižší N-letosti (doby opakování) než ty, které měly sloužit jako vstupy do modelu. Zároveň bylo zapotřebí hodnoty z Truplových tabulek extrapolovat do větších dob trvání než 120 minut, což jsou maximální hodnoty, které Trupl v tabulkách uvažuje. Bylo tedy nutné provést extrapolaci dvojího druhu: jednak extrapolace do vyšších N-letostí, jednak extrapolace do vyšších dob trvání. Obojí je svým způsobem snadno řešitelné např. pomocí proložení vhodné spojnice trendu a následného užití vygenerované rovnice. Situace je však komplikovaná zejména kvůli vysokému počtu nutných zopakování této operace (dáno množstvím stanic a množstvím potřebných N-letostí). Navíc je potřeba do získaných rovnic dosazovat vždy jiné hodnoty odvozených dob trvání dešťů. Z uvedených důvodů bylo přikročeno k provedení určité algoritmicke. Pomocí programového prostředí MATLAB byla vytvořena řada scriptů pro automatické provádění výše uvedených operací, převážně s využitím Curve Fitting Toolboxu. Vstupem do tohoto procesu je rozsáhlá matice obsahující údaje o závislostech dob trvání a intenzit dešťů dle Trupla pro všechny potřebné stanice. Automatizovaný postup nejdříve extrapoluje křivky do vyšších N-letostí (obr. 1). Pro prokládání uvedených závislostí byla použita logaritmická funkce dle rovnice (1):

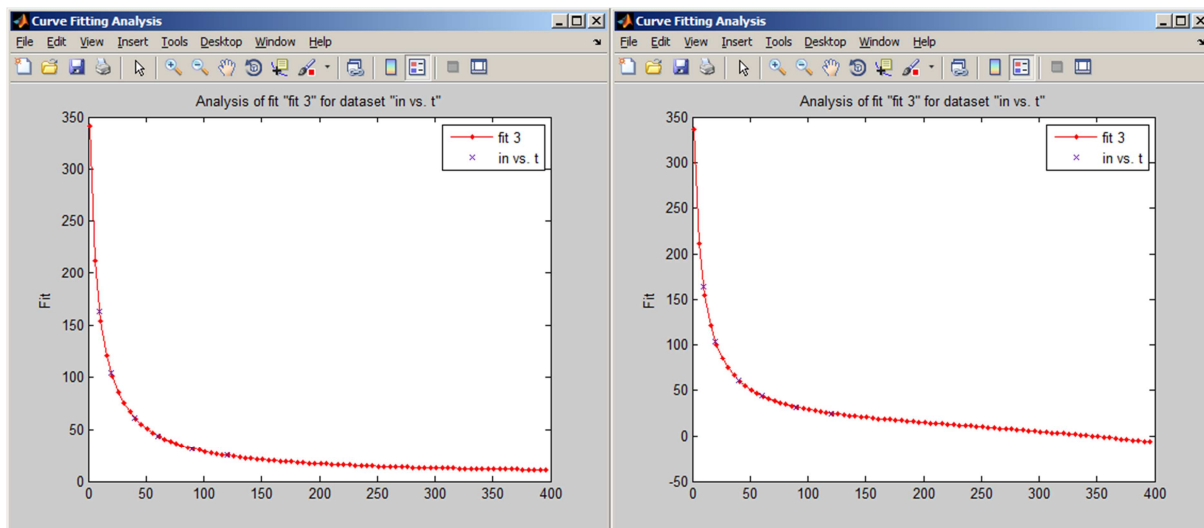
$$IN_T = a \cdot \ln(N) + b, \quad (1)$$

kde  $IN_T$  představuje intenzitu v  $\text{l.s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$  pro dobu  $T$  příčinného deště v minutách,  $N$  představuje N-letost a koeficienty  $a$  a  $b$  jsou voleny tak, aby křivka co nejlépe přiléhala známým hodnotám.



Obr. 1: Extrapolace intenzitních křivek do vyšších N-letostí

Po uvedeném odvození poloh těchto křivek pro dříve neznámé hodnoty v požadovaných vyšších N-letostech byla provedena extrapolace do vyšších dob trvání. Pro prokládání křivek známými hodnotami pro vyšší N-letosti byl hledán vhodný tvar rovnice. Pro řešení tohoto problému byl použit Curve Fitting Toolbox, který svým interaktivním prostředím umožňuje poměrně přehledně pracovat ve fázi, kdy jsou hledány vhodné tvary regresních rovnic. Pomocí nástroje Curve Fitting Analysis je navíc možné pro zvolený typ rovnice zobrazit průběh funkce v oblastech, do kterých má být extrapolováno, takže lze předběžně kontrolovat, zda má průběh funkce požadované vlastnosti (obr. 2).



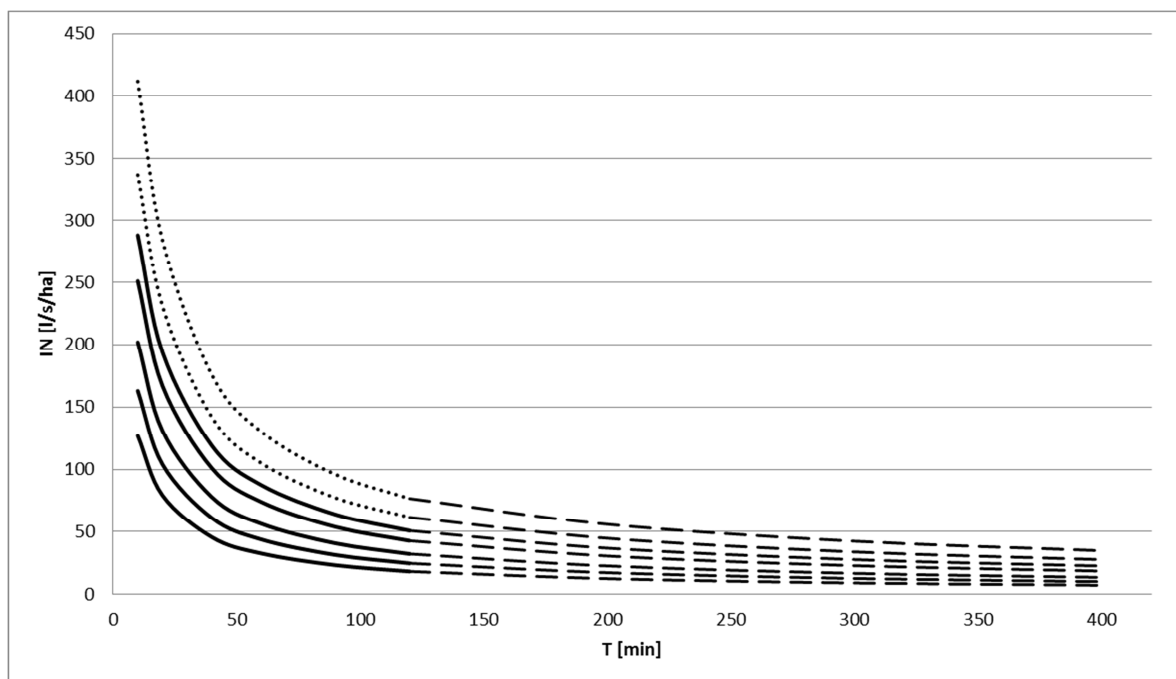
Obr. 2: Ukázka vhodného (vlevo) a nevhodného (vpravo) průběhu proložené funkce

Pro úspěšné prokládání křivek musejí být splněny následující požadavky: zvolený typ regrese musí co nejlépe přiléhat bodům, ze kterých se vychází; zároveň křivky nesmí pro žádnou z uvažovaných periodicit v časech, které jsou uvažovány jako následné vstupy do modelu, zabíhat do příliš nízkých nebo snad záporných hodnot. Intenzity také musejí s rostoucí dobou trvání deště vždy klesat. Rovněž je žádoucí, aby křivky pro vyšší N-letost vždy (pro stejný čas) vykazovaly vyšší intenzitu. Uvedeným podmínkám nejlépe vyhovovala rovnice následujícího tvaru:

$$IN = \frac{(p_1 \cdot T + p_2)}{T + q_1}, \quad (2)$$

kde  $IN$  představuje intenzitu,  $T$  dobu trvání deště a  $p_1$ ,  $p_2$  a  $q_1$  pak koeficienty, jež jsou voleny tak, aby křivka co nejlépe přiléhala známým hodnotám.

Oba dva typy extrapolace intenzitních křivek jsou pak viditelné na následujícím grafu (obr. 3).



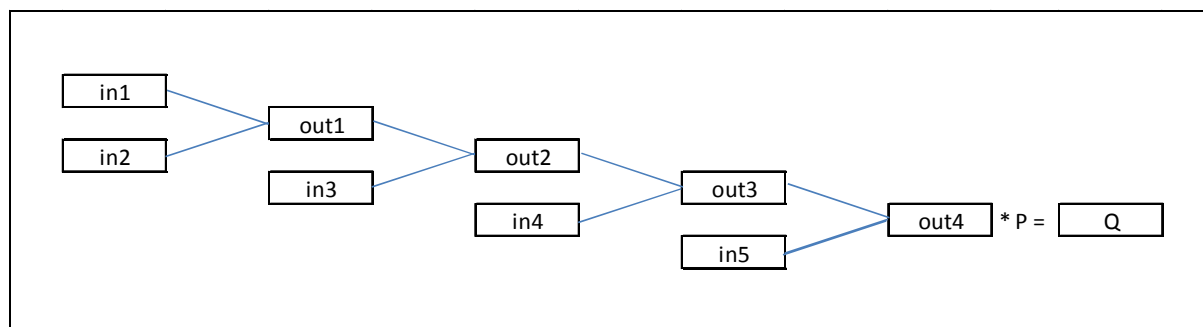
Obr. 3: Extrapolace intenzitních křivek do vyšších N-letostí a vyšších dob trvání

Plnou černou čarou jsou zobrazeny původní Truplovy hodnoty. Křivky ve vyšších N-letostech, než které uvádí Trupl, jsou zobrazeny tečkovaně. Extrapolace do vyšších dob trvání než 120 min jsou zobrazeny čárkovaně. Obr. 3 je ilustrativní – stanice, se kterými bylo pracováno, mají v Truplových

tabulkách zpravidla následující N-letosti: 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 a 20 či 25 let. Rozšíření bylo provedeno pro N-letosti 50, 100 a 200 let, přičemž pro účely modelování jsou využity zejména 100leté hodnoty. U všech těchto křivek pak bylo provedeno prodloužení do dob trvání až 400 minut, oproti původním 120 minutám.

### 3 Aplikace rozšířené matice dat

Nově vzniklá matice vzorových dat byla použita pro kalibraci modelu sestaveného na bázi teorie možnosti. Bližší informace o fuzzy logice či teorii možnosti v souvislosti s danou tematikou nejsou součástí tohoto příspěvku a jsou k dispozici dohledání např. zde [2], [3], [4]. Model ze zadaných vstupních veličin určuje velikost odtokové reakce malého povodí na přívalovou srážku. Model byl sestavován pomocí programového prostředí MATLAB, převážně s využitím Fuzzy Logic Toolboxu. Základní schéma je patrné z následujícího obrázku (obr. 4):



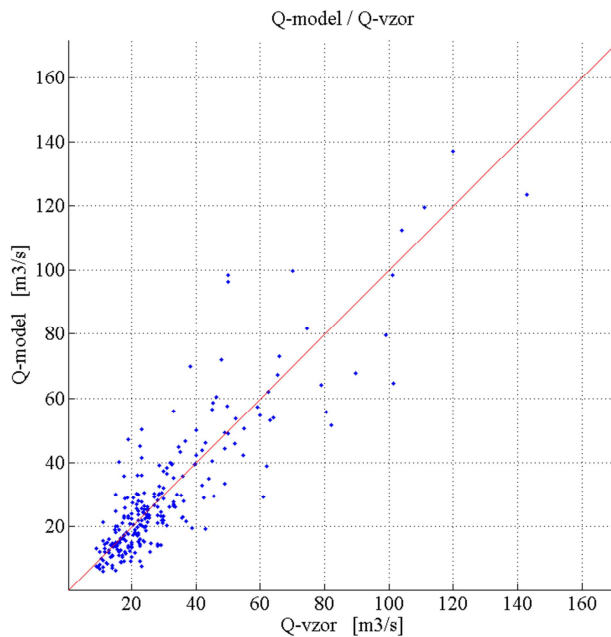
Obr. 4: Základní struktura modelu

Základní schéma modelu představuje sekvenci inferenčních systémů, které tvoří vždy 2 vstupující veličiny (označeny obecně *in*) a jedna výstupní veličina (*out*). Jednotlivé systémy jsou řazeny za sebou tak, že ke každé dílčí výstupní veličině je vždy přidána další vstupující veličina tak, aby celkově tvořily pár do dalšího inferenčního systému. Výjimku představuje vstup *P* reprezentující plochu povodí – plochou je poslední výstupní veličina prostě přenásobena.

Kalibrace modelu probíhá tak, že model je opakovaně spouštěn vždy s pozměněnými parametry. V každém cyklu dochází ke třem typům modifikací: tvar báze pravidel (přiřazení výstupní množiny dané kombinaci množin na vstupech), poloha a tvar funkcí možnosti (obdoba funkcí příslušnosti u fuzzy modelování; popisují dané universum) a váhy jednotlivých pravidel z matice báze pravidel. V každém běhu kalibrace jsou počítány hodnoty kritériálních funkcí, přičemž je snaha zmíněnými modifikacemi dosáhnout požadované extremalizace kritériálních funkcí. Celý proces pracuje s pamětí; pokud v kalibračním cyklu není modifikací dosaženo vhodnějšího tvaru modelu (příznivějších hodnot kritériálních funkcí), dojde k návratu k zatím nejlepší dosažené modifikaci modelu, ze které se následně vychází při další modifikaci.

### 4 Ukázka výsledků

Zde je uvedena ukázka výsledků, kterých bylo dosaženo pomocí jedné ze zvolených výpočetních variant modelu. Jedná se o variantu, kdy do modelu postupně vstupují vstupní veličiny v následujícím pořadí (dle základní struktury modelu – obr. 4): sklonitost povodí [-], lesnatost [%], průměrný specifický dlouhodobý průtok v závěrovém profilu povodí [ $\text{l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ ], hodnota CN čísla [-], doba trvání deště [min], intenzita deště [ $\text{mm.hod}^{-1}$ ], plocha povodí [ $\text{km}^2$ ]. Pro kalibraci modelu byla použita rozšířená matice vzorových dat, která byla sestavena výše popsáním postupem.



Obr. 5: Vztah modelového a vzorového průtoku po kalibraci modelu

Takováto kalibrace modelu může být považována za úspěšnou. Korelace uvedených veličin (průtok ze vzorových dat a modelový průtok) dosahuje hodnot 0.877. Každý z vykreslených bodů představuje jednu dešťovou událost. V ideálním (a čistě teoretickém) stavu by všechny body ležely na naznačené úhlopříčce. Kalibrovaný model je rovněž testován tzv. citlivostní analýzou, při které je sledován vliv každé ze vstupujících veličin na výstupní hodnotu průtoku. Popis principu této citlivostní analýzy je nad rámec obsahu tohoto příspěvku. Lze však konstatovat, že výsledky analýzy jsou příznivé; model na všechny vstupní veličiny nějakým způsobem reaguje, což je primární požadavek. Rovněž lze říci, že reakce modelu je adekvátní a logická. Např. s rostoucí hodnotou intenzity či doby trvání příčinného deště roste i odtoková reakce. Opačný vliv je možné vysledovat pouze u vlivu lesnatosti povodí, což je žádoucí – s rostoucím procentem lesů v povodí roste i retenční schopnost povodí a klesá množství odteklé vody.

## 5 Závěr

V příspěvku byl popsán způsob sestavení matice vzorových dat pro účely jednoduchého modelování v oblasti hydrologie. Matice obsahuje údaje o geografických parametrech sledovaných povodí a parametry uvažované příčinné přivalové srážky. Byl popsán postup nutných dílčích extrapolací – jednak do vyšších N-letostí, jednak do větších dob trvání. Oba typy extrapolace byly provedeny vždy pro nejbližší stanici daného povodí, a to pomocí řady scriptů s využitím Curve Fitting Toolboxu. Jedná se o vhodný nástroj pro řešení tematiky obdobného typu. Nově vzniklá matice (extrapolovaná do požadovaných rozměrů) svými hodnotami respektuje základní hydrologické zákonitosti, a lze ji tedy použít pro výše zmíněné účely. Celkem byla zpracována matice čítající 251 povodí z celé České republiky.

Sestavená matice byla použita pro kalibraci modelu, který určuje míru odtokové reakce malého povodí na přivalovou srážku. Z uvedených výsledků (obr. 5) je patrné, že model je schopen adekvátně reagovat na zadané vstupní hodnoty. Danou problematiku má smysl řešit pomocí uvedených nástrojů.

## Literatura

- [1] J. Trupl. *Intenzity krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy*. Český hydrometeorologický ústav, Praha, 1958.
- [2] K. Nacházel, M. Starý, J. Zezulák, J. *Využití metod umělé inteligence ve vodním hospodářství*. Academia, nakladatelství Akademie věd České republiky, Praha 2004, ISBN 80-200-02229-4.

- [3] K. Nacházel, P. Fošumpaur. *Teorie možnosti v hydrologii a vodním hospodářství*. Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2010, roč. 58, č. 2, s. 73-97. ISSN 0042-790X. DOI: 10.2478/v10098-010-0008-y.
- [4] P. Vysoký. *Fuzzy řízení*, Vydavatelství ČVUT, 1996, 131 s.

### **Poděkování**

Příspěvek vznikl za podpory specifického výzkumu FAST-13-2048 s názvem „Odtoková reakce malého povodí na přívalovou srážku“.