VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

VYUŽITÍ VYBRANÝCH METOD UMĚLÉ INTELIGENCE PRO NALEZENÍ MALÝCH POVODÍ NEJVÍCE OHROŽENÝCH POVODNĚMI Z PŘÍVALOVÝCH DEŠŤŮ

USE OF SELECTED ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS FOR FINDING SMALL WATERSHEDS MOST AT RISK OF FLASH FLOODS

DISERTAČNÍ PRÁCE – ZKRÁCENÁ VERZE
DOCTORAL THESIS – SHORT VERSION

AUTOR PRÁCE — Ing. PAVEL JEŽÍK
AUTHOR

ŠKOLITEL — prof. Ing. MILOŠ STARÝ, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2015

ABSTRAKT

Přívalové deště se na našem území mohou vyskytovat prakticky kdekoli. V současné době lze jejich výskyt odhadnout s určitým časovým předstihem, ale jejich předpovídaná lokalizace je velmi problematická. Nynější prostředky pro hledání ohrožených povodí se soustřeďují především na operativní vyhodnocování aktuální meteorologické situace a zpracování srážkové předpovědi na nejbližší hodiny (tzv. nowcasting). Práce se zabývá odlišným způsobem hledání potenciálně ohrožených území, kdy jsou vyhodnocovány statistické veličiny za dlouhé období (N-leté vody a dešťové charakteristiky) a dány do souvislostí s vlastnostmi konkrétních povodí. Celá problematika je řešena mimo situaci aktuálního ohrožení, jedná se o tzv. off-line řešení.

V práci je prezentován model sestavený na bázi vybraných metod umělé inteligence, který tvoří jádro koncové mapové aplikace. Užití modelu a koncové aplikace se předpokládá v oblasti, kde se rozhoduje o toku financí v souvislosti s protipovodňovou ochranou. Model se soustřeďuje na přívalové deště a povodně jimi způsobené.

KLÍČOVÁ SLOVA

Přívalové deště, povodně z přívalových dešťů, malé povodí, modelování, fuzzy logika, teorie možnosti, umělá inteligence.

ABSTRACT

In our region, heavy rains may occur virtually everywhere. Nowadays there are instruments to predict these events in sufficient advance, but without precise localisation, which is a problem. Present instruments for searching endangered watersheds are focused on operative evaluation of meteorological situation and actual precipitation forecast processing (nowcasting). The thesis brings quite different approach. Potentially endangered areas are detected with evaluation of long-term statistical variables (N-year discharges and rain characteristics) and properties of specific watershed. The whole issue is handled out of situation of actual danger, that is so called off-line solution.

The thesis describes a model based on selected artificial intelligence methods. The model forms the core of final map application. The use of model and final application is supposed to be in area of preventive flood protection, and related investment decision-making. The model focuses on heavy rains and flash floods.

KEYWORDS

Heavy rains, flash floods, small watershed, modelling, fuzzy logics, possibility theory, artificial intelligence.

OBSAH

1 ÚVOD 1

1.1 Přívalové deště 1
1.2 Povodně z přívalových dešťů 2
1.3 Možnosti předpovídání povodní z přívalových dešťů 3

2 PRÁCE ZABÝVAJÍCÍ SE PŘÍBUZNOU TEMATIKOU 4

3 CÍL PRÁCE 6

4 ZVOLENÉ PŘEDPOKLADY ŘEŠENÍ 7

5 METODA 8

5.1 Teorie fuzzy množin a fuzzy logika 8
5.1.1 Fuzzy množiny 9
5.1.2 Fuzzy logika 9
5.2 Teorie možnosti 10

6 POPIS MODELU 10

6.1 Sestavení modelu 10
6.2 Kalibrace modelu 11
6.2.1 Matice báze pravidel 12
6.2.2 Parametry funkcí možnosti 12
6.2.3 Váhy jednotlivých pravidel 13
6.2.4 Postupná optimalizace 13
6.2.5 Kriteriální funkce 14
6.2.6 Oblast mimo maximální odtoky při známé N-letosti 15
6.2.7 Varianty modelu pro různé N-letosti 16

7 APLIKACE 16

7.1 Vzorová data 16
7.2 Kalibrace a validace modelu 17
7.3 Citlivostní analýza 17
7.4 Dosažené výsledky 17
7.4.1 Validace modelu při rozdělení dat v poměru 2:1 18
7.4.2 Kalibrace celé množiny dat – podklad pro mapovou aplikaci 18
7.5 Mapová aplikace 20
7.5.1 Datové matice 20
7.5.2 Samotná mapová aplikace 20
7.6 Užití výstupů v poloprovozu operativního modelu ČHMÚ 22

8 SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ 24
9 ZÁVĚR A PŘÍNOS PRO ROZVOJ VĚDECKÉ DISCIPLÍNY 26
10 NÁMĚTY PRO DALŠÍ POKRAČOVÁNÍ VE VÝZKUMU 28
11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 29

1 ÚVOD

S rostoucím socioekonomickým rozvojem společnosti roste i její snaha umět čelit extrémním přírodním jevům. Obecně je v prvé řadě nutné předpokládat, že určitá událost vůbec může nastat, dále pak pokusit se předpovědět (místně i časově) vznik a průběh dané události a nakonec zvládnout vhodně operativně pracovat v průběhu samotné události tak, aby byly minimalizovány následky v podobě ztrát na životech a majetku. Mezi extrémní přírodní jevy patří i povodně. Zvláštní kategorii tvoří mimořádné povodně (např. při poruše vodního díla), jejichž vznik lze dopředu zpravidla jen velmi obtížně odhadnout. Vznik povodní způsobených regionálními dešti či povodní z tání sněhu je v dnešní době poměrně dobře odhadnutelný a předpovědi jsou schopné varovat obyvatele s určitým předstihem. To je dáno zejména kvalitou a charakterem meteorologické předpovědi, která hraje zásadní roli na straně vstupů do hydrologických modelů. Poněkud odlišná situace je v dnešní době v oblasti předpovídání povodní z přívalových srážek, tzv. flash floods. Podmínky pro jejich vznik se dají předpovědět, nicméně jejich předpokládaná lokalizace je pouze velmi přibližná a následný průběh je velmi dynamický.

Problematika predikce povodní z přívalových srážek a jednoduchého modelování srážko-odtokového procesu je značně zatížena neurčitostmi. Parametry popisující příčinnou přívalovou srážku, se kterými modely pracují, jsou zpravidla zpětně vyhodnocovány ze záznamů srážkoměrných stanic. Přesnost odvození těchto dat je limitována zejména hustotou srážkoměrných stanic, která vzhledem k tomu, že přívalové srážky postihují plošně poměrně malá území, nemůže být dostatečná. Mnohdy navíc dochází k tomu, že data nejsou při extrémních intenzitách (tedy při přívalových deštích) zcela spolehlivá. Rovněž transformace celého proměnlivého průběhu srážky do datově méně náročné formy, se kterou může model pracovat, vyžaduje přijetí množství zjednodušujících předpokladů, které však vedou ke snížení přesnosti vstupních dat do modelu. Nejistoty do výpočtů vstupují i v oblasti hydrologických dat – průtoky, které jsou odvozovány z hodnot vodních stavů. Mnohdy se navíc jedná o hodnoty zpětně odvozované až po kulminaci. Například při zpětném vyhodnocování extrémní přívalové povodně z roku 2009 na tocích Jičínky a Luhy byly kulminační průtoky stanoveny kompromisním řešením vycházejícím z porovnání výsledků hydraulických a srážkoodtokových modelů, přičemž chyba těchto odhadů byla stanovena na 20 % (ČHMÚ, 2010).

1.1 PŘÍVALOVÉ DEŠTĚ

Dešťové srážky obecně jsou charakterizovány třemi základními veličinami: doba trvání deště, intenzita deště (resp. specifická vydatnost) a velikost zasažené plochy. Přívalový déšť je definován jako déšť velké intenzity a v našich oblastech krátkého trvání a malého plošného rozsahu. Způsobuje prudké rozvodnění malých toků a značné zatížení kanalizačních sítí. Kritéria nejsou jednotná, za přívalový déšť je dle Hellmana považován déšť s množstvím 10 až 80 mm srážek spadlých za dobu menší než 180 minut (ČHMÚ, 2014). Jinou možností pro klasifikaci deště je např.

Wussovo kritérium (Dub, 1963). Hraniční hodnoty v mm a minutách však nejsou všeobecně považovány za jednoznačně definující přívalové srážky. Lze však říci, že se jedná o krátkodobou extrémní srážkovou událost.

Přívalové srážky se vyskytují převážně od druhé poloviny dubna do konce září. Jsou způsobeny typicky bouřkovými, konvekčními dešťovými srážkami velmi silné intenzity (v extrémních případech více než 100 mm za hodinu), s krátkým trváním (desítky minut), které zasahují svými plošně izolovanými jádry území o menší rozloze, zpravidla několik desítek km^2. Tyto lijáky jsou buď vázány na zvlněné studené fronty, nebo mohou vznikat silné bouřky v oblastech velmi labilního teplotního zvrstvení bez existence fronty. To znamená, že mohou vyvolat povodeň většinou na povodích malých toků, a to v kterékoliv oblasti České republiky. Představují nejpočetnější případy povodňového ohrožení (Matějíček, 1999).

1.2 POVODNĚ Z PŘÍVALOVÝCH DEŠŤŮ

Vznik povodní z přívalových srážek je přímo vázán na spadlou přívalovou srážku. Jednoznačnou příčinou těchto povodní je dopad přívalové srážky na povodí. Přívalové srážky o velkých intenzitách, krátké době trvání a malém plošném rozsahu tak logicky způsobují odtok na malých povodích, zpravidla o rozloze do několika desítek km^2. Reakce povodí na spadlou srážku je velmi rychlá (maximálně v řádu jednotek hodin) – enormní vzestup vodního stavu na malých vodních tocích, který je později následován také poměrně rychlým poklesem vodního stavu. Tyto druhy povodní lze sice ze synoptických situací předpokládat, ale nikoliv předpovědět přesně. Na předání informací zjišťovaných varovnými systémy chybí totiž zpravidla čas. To je také podstatná odlišnost povodní z přívalových dešťů od povodní, jež jsou vyvolávány dlouhotrvajícími několikadenními vlnami oblastních dešťů (Vašků, 2009). Může však také dojít k situaci, kdy povodně nejsou přímo vázány na vodní tok. Dochází tak k povrchovému odtoku velkého množství spadlé vody tam, kde je to dostatečně umožněno okolními terénními podmínkami – tedy zpravidla na malých povodích s velmi nízkým podílem zalesněných ploch, na plochách s obnaženými ornými půdami.

Ve 20. století bylo na Moravě a ve Slezsku zaznamenáno celkem 302 případů povodní z přívalových dešťů. Databáze je do velké míry ovlivněna hustotou staniční sítě ČHMÚ a tím, že povodně z přívalových dešťů jsou lokální jev, někdy špatně postihnutelný. Pokud při nich nedošlo přímo k ovlivnění konkrétní oblasti lidské činnosti, nemusí být vůbec zaznamenány (Brázdil, 2007). Hustota záznamů je tedy přímo ovlivněna hustotou osídlení a hustotou monitorovací sítě.

Co se týče ekonomických dopadů, největší škody jsou zpravidla zaznamenány na dopravní infrastruktuře (často i přes 50 % celkových ekonomických ztrát), dále pak na vodohospodářských objektech, vodních tocích a bytovém fondu obyvatel. Mezi ekonomické dopady se zahrnují také náklady na okamžité nasazení Armády České republiky a dalších pomocných složek, ať už při okamžitém nasazení (v průběhu povodně) nebo na dodatečné likvidování škod a pomoc postiženým obyvatelům. Nelze nezmínit i ztráty na životech; např. při povodních z června 2009 nebo v přímé

souvislosti s nimi bylo hlášeno celkem 15 úmrtí (8 osob utonulo, 7 zemřelo v důsledku vzniklé situace) (Ministerstvo životního prostředí České republiky, 2009).

1.3 MOŽNOSTI PŘEDPOVÍDÁNÍ POVODNÍ Z PŘÍVALOVÝCH DEŠŤŮ

Při řešení problematiky předpovídání povodní z přívalových dešťů je předně nezbytné ujasnit si rozdíl mezi off-line a on-line řešením. On-line přístup představuje řešení nastalé situace těsně před nebo již v průběhu sledované situace. Jedná se o operativní nakládání s daty o současném stavu s předpověďmi na nejbližší hodiny. Tato data pak slouží jako vstup pro okamžité výpočty a předpovědi odtokové reakce povodí na nastalou a předpovězenou situaci. V dnešní době představuje předpovídání přívalových povodní jedno z nejaktuálnějších témat operativní hydrologie. Obzvláště s rozvojem radarových odhadů srážek a tzv. nowcastingem je dnes již možné poskytnout dostatečná vstupní data pro předpovědní modely. Obecně je totiž velmi obtížné předpovídat určitý jev (povodně z přívalových dešťů) na základě jiné předpovědi (odhad vývoje srážek). Celá situace je navíc o to komplikovanější, že vývoj přívalových dešťů je velmi dynamický a jejich místní vymezení je poměrně ostře ohraničeno.

Odlišný přístup pak představuje řešení této problematiky tzv. off-line. V tomto případě není pracováno s aktuálními údaji o srážkách, ale je preventivně – tedy v době, kdy bezprostředně nehrozí nebezpečí – hledáno případné problémové místo, malé povodí ohrožené tímto jevem. Užití tohoto přístupu pak má smysl zejména v oblastech, kde se rozhoduje o investicích ve spojitosti s preventivní ochranou před přívalovými povodněmi. Jedná se o předběžné výpočty, jež odhadují předpokládanou odtokovou reakci povodí po dopadu srážky o zadaných parametrech. Je pracováno s měřenými nebo odvozenými srážkovými hodnotami. Tato oblast je předmětem řešení předložené disertační práce.

V souvislosti s výskytem extrémních přívalových dešťů a povodněmi jimi způsobenými jsou v současnosti vyvíjeny systémy pro včasné varování obyvatel. V USA se jedná o systém Flash Flood Guidance (dále *FFG*) (Ntelekos, 2006) provozovaný National Weather Service, který je založen na operativním srovnávání předpovídaných srážkových úhrnů se stanovenými hodnotami potenciálně nebezpečných úhrnů.

Tyto systémy se většinou skládají ze dvou částí. Prvním z nich je modul preventivní výstrahy z hlediska nebezpečné úrovně srážek. Ten je založen na zhodnocení charakteristik území z hlediska jeho potenciálu ke tvorbě rychlého odtoku a současně na průběžném vyhodnocování aktuální nasycenosti povodí. Na základě uvedených podkladů je prezentováno aktuální potenciální nebezpečí vzniku povrchového odtoku ve formě plošně diferencované mapy úhrnu srážek, při němž by došlo ke vzniku povrchového odtoku.

Druhou součástí systému typu *FFG* pak může být modul odhadu odtokové reakce v reálném čase. Ta je většinou založena na kombinaci jednoduchých hydrologických modelů pro odhad přímého odtoku s real-time radarovými odhady srážek. Takové

řešení umožňuje automatizaci celého procesu přípravy výstupu ve velmi krátkém časovém horizontu a s dostatečnou frekvencí odpovídající dynamice vývoje konvektivních jevů.

Další možností je výpočet intenzity odtokové reakce na základě modelů založených na obecně dostupných informacích z digitálního modelu terénu, půdních a vegetačních charakteristikách, které modelují odtokovou ztrátu a přímý odtok z povodí. V případě aplikace tohoto postupu je nezbytná definice limitních stavů pro porovnání simulovaného odtoku a jeho kritické úrovně. Nastavení limitů je přitom velmi citlivou závislostí, která rozhoduje o tom, zda nebude docházet k příliš častým výstrahám (signalizaci nebezpečí, které ve skutečnosti nenastává) či naopak k nepodchycení všech skutečně nebezpečných událostí (ČHMÚ, 2009).

V konvektivní sezóně u nás ČHMÚ provozuje tzv. indikátor přívalových povodní. Výstupy z tohoto indikátoru jsou dostupné na internetu (ČHMÚ, 2015). Indikátor pracuje s odhadem aktuálního nasycení území vodou vždy k osmé hodině ranní. Denně aktualizovaná mapa umožňuje náhled současné situace. Středoevropskými státy je v současnosti vyvíjený systém INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis – Central Europe). Jedná se o moderní přístupy založené na metodách radarového nowcastingu v kombinaci s pozemním monitorováním srážek a dalšími vstupy, které jsou napojené na hydrologické modely.

Mezi další evropské systémy pak lze zařadit např. tyto: (Norbiato, 2008), (Fouchier, 2007), (Taramasso, 2005). V České republice se pak operativní předpovědí povodní z přívalových srážek za použití metod umělé inteligence zabývají např. tyto práce: (Janál, 2009), (Janál, 2012).

V souvislosti s danou tematikou jsou v současnosti vyvíjeny systémy pro včasné varování obyvatel. Jedná se o systémy, které pracují s aktuálními naměřenými hodnotami srážkových úhrnů z vhodně umístěných srážkoměrů, které jsou napojeny na rozhlasové systémy samosprávných celků.

2 PRÁCE ZABÝVAJÍCÍ SE PŘÍBUZNOU TEMATIKOU

Hledání povodí, která jsou ohrožena povodněmi, vždy vyžaduje alespoň do určité míry zvládnutí problematiky srážko-odtokového modelování. Tato oblast je v dnešní době poměrně dobře popsána. V následujícím textu bude uveden výčet nejpoužívanějších srážko-odtokových modelů.

Model MIKE-SHE je komerčním produktem dánské filmy DHI. Jedná se o koncepční semi-distribuovaný model s vazbou na prostředí GIS. Umožňuje řešení širokého spektra hydrologických úkolů jako plánování a řízení v oblasti vodních zdrojů nebo posuzování vzájemných interakcí mezi povrchovou a podzemní vodou. Rovněž umožňuje řešení technických zásahů v povodí (DHI, 2014). Jedná se o poměrně často používaný modelovací systém.

Americký model HEC-HMS představuje celistvý model se soustředěnými parametry. Jedná se o široce používaný srážko-odtokový model pro řešení celé řady hydrologických úkolů. Obsahuje mnoho komponent od výpočtu tání sněhové pokrývky, přes výpočet objemu přímého i podzemního odtoku. Rovněž umožňuje

aplikaci různých rozdělovacích objektů či nádrží. Jednotlivé kalibrační parametry mohou být určovány automaticky nebo manuálně. V současné době model umožňuje široké napojení na systémy GIS pomocí různých komponent. Podrobný popis modelu je dostupný v (Feldman, 2000) nebo (Scharffenberg, 2009).

Počátky epizodního distributivního srážko-odtokového modelu HYDROG sahají do roku 1991. Model je určen pro simulaci, operativní předpovědi a operativní řízení odtoku vody z povodí s nádržemi za povodňových situací. Praxe ukazuje, že může být nasazen ve velmi širokém rozpětí ploch modelovaných povodí. Je určen pro letní povodně i pro zimní povodně způsobené táním sněhové pokrývky. Hydraulické formulace řídicích rovnic systému zajišťují propojení podle grafové reprezentace plošného odtoku s pohybem vody v korytě a zavádí i transformaci vlny při průchodu nádržemi. Pro simulaci neustáleného proudění v korytě je využito zjednodušení Saint-Venantových rovnic kinematickou vlnou. Podzemní odtok je simulován jako odtok z jediné fiktivní nádrže. V současnosti je systém HYDROG používán na brněnské a ostravské pobočce ČHMÚ. Dále je HYDROG využíván státními podniky Povodí Odry, Povodí Moravy, Povodí Labe a Povodí Ohře (Starý, 2005).

Model KINFIL je založen na kombinaci teorie infiltrace a transformace přímého odtoku kinematickou vlnou. Model se osvědčil na řadě experimentálních povodí při rekonstrukci historických povodňových případů. KINFIL používá fyzikálně-geometrické, hydraulické a klimatické parametry povodí, které se dají určit z mapových podkladů. K výpočtu infiltrace model využívá metodu založenou na konceptu Greena a Ampta. Model je přednostně určen pro stanovení návrhových průtoků při různých variantních simulacích, např. při změnách land use (Starý, 2005).

Hydrologický model DesQ je určen pro výpočet maximálních průtoků v nepozorovaných povodích. Programový systém uvažuje povodí, které lze popsat jako jednu odtokovou plochu (samostatný svah) nebo jako modelové povodí s údolnicí (dvě odtokové plochy). Přírodní povodí lze schematizovat více modelovými povodími, výsledný průtok v závěrovém profilu pak odvozuje superpozicí hydrogramů z jednotlivých modelových povodí. Model je rovněž využitelný pro odvození objemu a tvaru povodňové vlny a pro případné posouzení vlivu změn charakteristik povodí na průběh hydrogramu (Hrádek, 1998). Model neumožňuje plošné testování skupiny malých povodí zátěžovou srážkou o zvolených parametrech, pouze výpočty na jednotlivých povodích.

V rámci projektu Ministerstva životního prostředí Vyhodnocení povodní v červnu a červenci 2009 na území České republiky byl v rámci dílčí části projektu pod názvem Metodika mapování povodňového rizika prezentován Metodický návod pro identifikaci kritických bodů (VÚV, 2009). Metoda kritických bodů je založena na podrobné analýze pomocí nástrojů GIS. Vstupními podklady jsou digitální model terénu vytvořený na základě výškopisu a polohopisu základní báze geografických dat (ZABAGED), digitální databáze vod (DIBAVOD) pro analýzu základních hydrologických poměrů, dále pak hranice intravilánů obcí, hranice katastrálních území, ortofotomapy (CENIA) a databáze krajinného pokryvu (CORINE land

cover). Pomocí nástrojů GIS je odvozena mapa směrů odtoku a do míst, kde odvozené dráhy soustředěného odtoku protínají hranice zastavěných částí obcí, jsou umístěny kritické body. Metoda pracuje s určitými kombinovanými kritérii pro výběr kritických lokalit, přičemž zavádí tzv. ukazatel kritických podmínek vzniku negativních projevů povodní z přívalových srážek.

Na Ústavu vodního hospodářství krajiny Fakulty stavební VUT v Brně byla roku 2011 obhájena disertační práce Ing. Petra Janála s názvem Operativní předpovědi odtoku vody z povodí za povodní způsobených přívalovými srážkami pomocí fuzzy modelu (Janál, 2011). Práce popisuje sestavení fuzzy modelu pro účely operativní předpovědi ohroženosti malých povodí povodněmi z přívalových dešťů. Zásadní rozdíl mezi předloženou prací a prací Ing. Janála spočívá v základním přístupu řešení dané problematiky; Práce Ing. Janála se zabývá operativní předpovědí, zatímco předložená práce řeší situaci tzv. off-line, tedy v okamžiku, kdy nehrozí bezprostřední nebezpečí, nezávisle na aktuálním stavu – např. informace o stavu nasycení půdy není brána v úvahu, její hodnota je považována za průměrnou. Cílem práce je sestrojení účinného nástroje pro preventivní ochranu před povodněmi z přívalových dešťů. Významnou odlišností je pak také volba teoretického nástroje pro sestavení modelu – předložená práce prezentuje sestavení modelu na bázi teorie možnosti, zatímco práce Ing. Janála je založena na klasickém fuzzy modelu.

3 CÍL PRÁCE

Práce se zabývá sestrojením účinného softwarového nástroje pro řešení problematiky preventivní ochrany malých povodí před povodněmi z přívalových dešťů. Cílem je vytvoření objektivního nástroje pro hledání malých povodí nejvíce ohrožených tímto jevem. Představa je taková, že konečný softwarový produkt bude sloužit případně i méně odborné veřejnosti – např. úředníci na příslušných místech či starostové obcí – jako objektivní nástroj, který může pomoci při rozhodování o toku peněz v souvislosti s preventivní ochranou před povodněmi z přívalových srážek.

Jádro celé aplikace tvoří model, který je sestaven na bázi vybraných metod umělé inteligence, zejména na bázi fuzzy logiky a teorie možnosti. Okrajově bylo testováno i užití neuronových sítí. Výhodou těchto metod je jejich schopnost uspokojivě pracovat s veličinami, které jsou značně zatíženy neurčitostmi, či jsou vágně popsány. V případě (byť jednoduchého) hydrologického modelování nutně musí být pracováno s přibližnými hodnotami (značně zatíženými nejistotami) – jedná se zejména o veličiny popisující příčinný přívalový déšť a o hodnoty průtoků, které reprezentují odezvu malého povodí. Výhodou užití teorie možnosti je, že lze pracovat i v oblastech nereálných kombinací stavů na vstupech.

Práce je zaměřena na oblast preventivní ochrany. Jedná se o tzv. off-line řešení dané problematiky, kdy vyhodnocování ohroženosti jednotlivých povodí probíhá v době mimo aktuální ohrožení přívalovými dešti. Aplikace se pak předpokládá při jakémsi průměrném stavu povodí (průměrný stav nasycení). Není zde pracováno s aktuální předpovědí srážek na nejbližší hodiny dopředu. Cílový softwarový nástroj

je sestavován tak, aby uživatel mohl plošně zatěžovat množinu malých povodí srážkami o zvolených parametrech a sledovat, jak na dané srážky jednotlivá povodí reagují. Porovnáním modelových odtokových reakcí se zadanými limitními hodnotami kulminačních průtoků, kdy ještě nedochází k problémům v dané lokalitě, pak lze vysledovat, u kterých povodí daná zatěžovací srážka způsobí problém. Může totiž docházet k situacím, kdy např. 20letý průtok na jednom povodí způsobí problémovou situaci, zatímco u jiného povodí 20letá voda bezpečně projde korytem, aniž by došlo k ohrožení. Výstupem z celé aplikace je výčet povodí, kde při zadaném dešti bude docházet k ohrožení a kde by bylo vhodné učinit nějaká opatření pro ochranu před povodněmi z přívalových dešťů.

Objektivní nástroj tohoto typu v současnosti úředníkům i dalším případným uživatelům chybí, a proto by v budoucnu mohl k těmto účelům sloužit výsledek předložené práce. Kalibrace modelu je postavena na užití dat o reálných základech a data jsou podložena dlouhodobým pozorováním. Lze předpokládat, že výstupy z modelu sestaveného na takovém podkladu přinesou spolehlivé výsledky.

Zároveň je cílem sestavit nástroj, který by byl pokud možno co nejméně náročný na množství a obtížnost určení vstupních dat. Od přístupů, které jsou představeny v předchozí kapitole, se sestavený model liší tím, že pro následnou aplikaci vyžaduje poměrně malé množství vstupních veličin a jejich určení není příliš náročné, případně zcela závislé na dalších programových prostředích či metodických postupech.

4 ZVOLENÉ PŘEDPOKLADY ŘEŠENÍ

Pro řešení dané problematiky bylo přijato několik zjednodušujících předpokladů:

- Ohroženost povodí povodněmi z přívalových dešťů je posuzována výhradně z hlediska očekávaných kulminačních průtoků po dopadu příčinného deště. Ohrožení jiného druhu (např. půdní eroze, sesuvy půd apod.) zde nejsou brána v úvahu.
- Při sestavování matice vzorových dat byl přijat základní předpoklad, že srážková epizoda o dané N-letosti způsobí odtokovou reakci povodí o téže N-letosti. Nelze říct, že tato skutečnost platí obecně. Sestavený model si klade za cíl algoritmizovat kauzální vztah přívalové srážky (příčina) a následné odtokové reakce malého povodí (následek). Se všemi vstupy a výstupy je nakládáno jako se statistickými veličinami, odvozenými z dlouhodobého pozorování. Užití modelu se předpokládá v oblasti preventivní ochrany, kdy jsou testovaná povodí v jakémsi „průměrném“ stavu. Při zpracování srážkových a průtokových dat s dlouhou dobou pozorování jsou parametry srážky (doba trvání a intenzita) odvozeny i příslušné doby opakování sledovaných jevů. Teoretická kauzalita jevů je podepřena rozsáhlým množstvím dat z historického měření (případně odvozování). Předložená práce se zabývá dlouhodobým stavem povodí a jeho teoretickou reakcí na teoretický déšť o stanovených parametrech. V těchto souvislostech se považuje předpoklad o odpovídajících si dobách opakování srážek a odtokových reakcí za přijatelný a opodstatněný.
- S výše uvedeným souvisí i otázka zahrnutí vstupu, který by charakterizoval předchozí nasycení půdy. Nabízí se užití veličiny *API* (*Antecedent Precipitation Index*). Pokud by byla řešena problematika operativní předpovědi (a bylo by tedy pracováno s on-line daty), bylo by použití této veličiny nezbytné. V případě řešení off-line, což je náplní předložené

práce, lze informaci o předchozím nasycení povodí zanedbat a považovat ji ve všech případech za průměrnou.

- Dalším zjednodušením je fakt, že model pracuje s náhradní intenzitou deště – uvažuje konstantní intenzitu po celou dobu trvání deště, a to nad celou plochou sledovaného malého povodí. Jedná se o teoretický stav a významné zjednodušení, nicméně aplikace jiného způsobu řešení by byla příliš komplikovaná a pravděpodobně by nepřinesla lepší výsledky.

Uvedená zjednodušení jsou sice významná, ale vzhledem k množství nejistot, které do celého procesu vstupují, je lze považovat za přijatelná.

5 METODA

V kapitole jsou uvedeny základy fuzzy logiky a teorie možnosti. Uvedené metody sloužily jako teoretický podklad pro sestavování modelu.

5.1 TEORIE FUZZY MNOŽIN A FUZZY LOGIKA

Metody, které umožňují snadno pracovat s vágně či neúplně popsanými veličinami, jsou označovány souhrnným termínem *soft computing*. Do oblasti soft computing bývají zařazovány fuzzy logika, neuronové sítě, genetické algoritmy či teorie chaosu (Berka, 2003). Fuzzy logika tedy přináší účinný nástroj pro modelování systémů, do kterých vstupují veličiny značně zatížené neurčitostí.

Fuzzy logika svým principem vychází z teorie fuzzy množin, jejíž základy popsal kalifornský profesor Lofti A. Zadeh ve své práci (Zadeh, 1965). Ve své podstatě popisuje teorie fuzzy množin situaci, kdy nelze příslušnost prvku do množiny rozhodnout na základě bivalentního rozhodování klasické výrokové logiky – tedy rozhodování na úrovni 1, nebo 0, případně „pravda“, nebo „nepravda“. Zadeh zavádí tzv. funkci příslušnosti, která definuje příslušnost prvku do množiny pomocí hodnoty na intervalu 0 až 1. Odtud je odvozen název fuzzy, který lze přeložit jako mlhavý či neostrý.

V zahraniční literatuře se věnuje problematice fuzzy množin, fuzzy logiky a jejich aplikacemi zabývá mnoho autorů. Kromě L. A. Zadeha jsou to práce tvůrce prvního fuzzy regulátoru A. Mamdaniho, jeho žáka – japonského fuzzy teoretika M. Sugena (Sugeno, 1977), (Tagaki, Sugeno, 1985). Dále pak D. Dubois a H. Prade (Dubois, Prade, 1980), J. R. Jang (Jang, 1992,1993) či velmi rozsáhlá publikace pánů G. J. Klir a B. Yuan (Klir, Yuan, 1995).

Z domácích autorů je lze zmínit např. V. Nováka se svou prací (Novák, 1990), která přináší teoretický rozklad problematiky včetně příkladů aplikací. Dále pak P. Jura (Jura, 1998), M. Pokorný (Pokorný, 1996) a další. Aplikováním fuzzy logiky do vodního hospodářství se u nás zabývali M. Starý (Starý, 2001), K. Drbal (Drbal, 1999) či Nacházel, Patera a Hejzlar (Nacházel a kol., 1999).

V následujícím textu je podrobněji popsán principy fuzzy množin a fuzzy logiky tak, jak jej uvádějí odborné publikace (Nacházel, 2004), (Pokorný, 1996), (Vysoký, 1996).

5.1.1 Fuzzy množiny

V teorii klasických množin prvek do množiny buď patří, nebo nepatří. Hovoříme pak o (plné) příslušnosti nebo nepříslušnosti prvku do dané množiny. V Zadehově fuzzy množinové teorii, je fuzzy množina definována jako třída, která přiřazuje prvkům neurčitost pomocí vlastnosti jejich částečné příslušnosti formou tzv. míry příslušnosti.

Definici fuzzy množiny a funkce příslušnosti je možné ve většině zahraničních publikací nalézt v následující formě. Jestliže U je souborem prvků označovaných x, potom fuzzy množina A v prostoru U je definována jako množina uspořádaných dvojic

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in U\},$$

kde $\mu_A(x)$ označuje funkci příslušnosti fuzzy množiny A. Funkce příslušnosti přiřazuje každému prvku x prostoru U (universum) stupeň příslušnosti z intervalu <0,1>, přičemž příslušnost prvku do prostoru lze interpretovat takto:

$\mu_A(x) = 0$ ... prvek x do prostoru U nepatří,

$\mu_A(x) = 1$ ... prvek x do prostoru U patří,

$\mu_A(x) \in (0,1)$ ... nelze s jistotou určit, zda x patří do U, přičemž velikost $\mu_A(x)$ je vyjádřením stupně, míry příslušnosti x do U.

Klasifikace určitého objektu mírou příslušnosti k určité fuzzy množině je ryze subjektivní a její velikost záleží čistě na vnitřním přesvědčení lidského experta. Z tohoto hlediska nelze zaměňovat míru příslušnosti $\mu(x)$se statistickou, objektivně vypočitatelnou hodnotou pravděpodobnosti $P(x) \in \langle 0,1 \rangle$. Velikost $\mu(x)$je často označována jako možnost jevu, že prvek x patří do prostoru U. Označíme-li tuto možnost jako $M(x) \in \langle 0,1 \rangle$, lze obecně vyjádřit vztah mezi možností a pravděpodobností jevu takto

$$M(x) \geq P(x).$$

S fuzzy množinami je možné provádět operace obdobně jako s klasickými množinami. Operace průniku, sjednocení a doplňku je možné zavést i pro fuzzy množiny, obdobně jako u ostrých množin, jejich interpretace však není tak jednoduchá. Řada publikací obsahuje i další operace. Zevrubnější popis problematiky operací s fuzzy množinami není součástí tohoto textu a lze jej dohledat v jiných publikacích, např. v (Dubois, Prade, 1980).

5.1.2 Fuzzy logika

S teorií fuzzy množin úzce souvisí fuzzy logika. Tímto pojmem jsou označovány dva různé typy logiky: jednak vícehodnotová logika, která na rozdíl od klasické dvouhodnotové logiky pracuje s více pravdivostními hodnotami, jednak lingvistická logika, jejíž pravdivostní hodnoty jsou vyjádřeny jazykově (slovy). Pravdivostní hodnoty jsou modelovány pomocí fuzzy množin v intervalu <0,1>.

Vícehodnotová logika zobecňuje klasickou dvouhodnotovou logiku a přibližuje se způsobu myšlení člověka, pro kterého je běžné přibližné a vícehodnotové usuzování. Vícehodnotová logika je jedním z typických nástrojů metod umělé inteligence. Jazykovou (lingvistickou) logikou je pak nazývána taková vícehodnotová logika, ve

které jsou pravdivostní hodnoty vyjádřeny pomocí slovního ohodnocení. Interpretace jednotlivých pravdivostních hodnot je přitom vágní.

5.2 TEORIE MOŽNOSTI

Teorie možnosti (*Theory of Possibility* nebo *Possibility Theory*) přímo vychází z teorie fuzzy množin a fuzzy logiky. Její základy položil L. A. Zadeh v 70. letech 20. století v článku *Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility* (Zadeh, 1978), kde definuje její vztah k fuzzy logice a zavádí distribuční funkci možnosti jako alternativu k pravděpodobnostnímu přístupu při řešení úloh. Postupně pak pronikla do mnoha vědeckých oblastí. Ze zahraničních publikací, které se dále zabývají teorií možnosti, lze zmínit například následující: (Dubois, 1988) nebo (Dubois, 2006).

Z českých autorů zabývajících se mimo jiné teorií možnosti lze zmínit např. (Nacházel a kol., 2010). V následujícím textu je přiblížena teorie možnosti tak, jak v textu uvádí (Nacházel a kol., 2010).

Teorie možnosti rozšiřuje původní teorii fuzzy množin o řešení možnosti nastání neurčitých jevů, které nelze zachytit pomocí pravděpodobnosti. Jde o další druh neurčitosti, která se zkoumá tak, že průběh funkce příslušnosti se ztotožní s rozložením možnosti a odhadne se možnost nastání hledané hodnoty. Pro vodní hospodářství je lákavý především odhad nastání extrémních hodnot hydrologických veličin. Nejjednodušším postupem, jak takové možnosti různých jevů nebo událostí odhadnout, je jejich ztotožnění s funkcí příslušnosti fuzzy množiny. Pak tzv. distribuční funkce možnosti je numericky definována jako ekvivalent funkce příslušnosti. Proměnná $\pi_x(u)$ se nazývá stupeň možnosti, který může nabývat jakékoli hodnoty na intervalu [0,1] (Nacházel a kol., 2010). Tato možnost je však vždy větší nebo rovna než pravděpodobnost nastání určitého jevu.

Teorie možnosti představuje určitou nadstavbu fuzzy logiky; má schopnost eliminovat oblasti řešení, které jsou mimo realitu – např. situaci, kdy je povodí zatíženo extrémně intenzivní srážkou o extrémně dlouhé době trvání. Při zadávání vstupů do výpočetního procesu je tato kombinace přípustná navzdory reálné nemožnosti nastání tohoto stavu. To je řešeno pomocí vytěsňování nereálných kombinací stavů, jehož princip je popsán v kapitole Kalibrace modelu.

6 POPIS MODELU

6.1 SESTAVENÍ MODELU

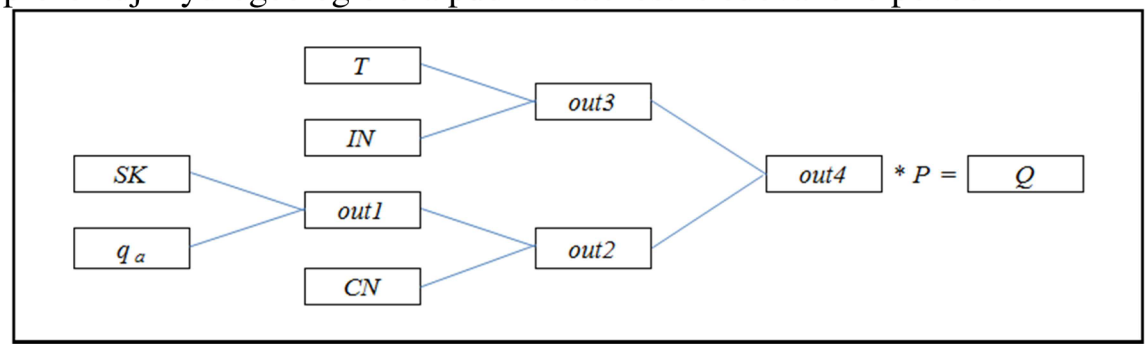
Jádrem celé aplikace je model, který z vybraných vstupních veličin, které charakterizují sledované povodí a příčinný přívalový déšť, určuje hodnotu kulminačního průtoku, jakožto odezvu daného povodí na příčinný přívalový déšť. Výstupní hodnota průtoku je následně porovnána s hodnotou limitního průtoku povodí. Tato hodnota musí být dopředu známa nebo stanovena.

Model je sestavován v programovém prostředí MATLAB, převážně s využitím Fuzzy Logic Toolboxu. Základní struktura modelu byla postupně volena v několika variantách.

V průběhu prací na konstrukci modelu bylo postupně testováno užití následujících vstupních veličin, protože se předpokládá, že na výstupní hodnotu kulminačního průtoku Q mohou mít vliv:

- plocha povodí P [km^2],
- sklonitost povodí SK [%],
- lesnatost povodí LES [%],
- průměrný dlouhodobý průtok Q_a v místě uzávěrového profilu [m^3.s^{-1}],
- průměrný specifický odtok z povodí q_a v místě uzávěrového profilu [l.s^{-1}.km^{-2}],
- průměrná hodnota CN čísla povodí [-],
- doba trvání deště T [min],
- průměrná intenzita deště IN [mm.hod^{-1}].

U vstupních veličin q_a (resp. Q_a) a CN se předpokládá, že určitým způsobem reprezentují hydrogeologické a půdní vlastnosti sledovaného povodí.



Obr. 6.1 *Finální verze základní struktury modelu*

Obr. 6.1 představuje finální verzi základní struktury modelu. Model je tvořen čtyřmi inferenčními systémy, přičemž každý z nich pracuje se dvěma vstupními veličinami a jednou (pomocnou) výstupní veličinou. První dva inferenční systémy (spodní větev) zpracovávají vlastnosti povodí. Je zde pracováno se sklonitostí povodí SK, průměrným specifickým odtokem z povodí q_a v místě uzávěrového profilu a průměrným CN číslem daného povodí. Pomocné dílčí výstupní veličiny (v obou větvích) jsou značeny *out* a postupně číslovány. Horní větev systému zpracovává parametry návrhového zatěžovacího deště – doba trvání T a intenzita IN. Poslední inferenční systém pak zpracovává dílčí výstupní veličiny *out2* a *out3* z obou větví. Finálním krokem je prosté přenásobení posledního dílčího výstupu *out4* plochou povodí P. Výstupem z modelu je předpokládaný kulminační průtok Q. Hodnota průtoku je pak v následné aplikaci porovnána s limitní hodnotou průtoku, a jsou tak hledána ohrožená povodí.

Použití uvedených veličin (SK, q_a, CN, T, IN a P) je podloženo dlouhodobým testováním různých vstupních veličin. Užití právě těchto veličin přineslo nejlepší výsledky. Rovněž bylo testováno pořadí těchto veličin. Rozdělení základní struktury do dvou větví – větev reprezentující testované povodí a větev reprezentující příčinný déšť – vedlo k lepší reakci modelu na měnící se dešťové parametry.

6.2 KALIBRACE MODELU

Kalibrace modelu probíhá za užití vzorových dat. Model je opakovaně spouštěn, přičemž jsou v jednotlivých optimalizačních cyklech postupně měněny dílčí

parametry modelu tak, aby se výstupní hodnoty (kulminační průtoky) co nejvíce shodovaly s odpovídajícími hodnotami z matice vzorových dat. Dílčí složky modelu jsou měněny náhodně, případně náhodně s určitými omezeními, s užitím náhodných čísel. Jedná se o obdobu metody Monte Carlo. V každém cyklu optimalizace dochází po provedení určité modifikace k výpočtu kriteriální funkce. Hodnota kriteriální funkce je porovnána s hodnotou, která byla dosažena v předchozím cyklu, a pokud bylo dosaženo příznivějšího výsledku, je tato modifikace uložena do paměti a je s ní pracováno dál. Nevedla-li poslední modifikace k lepším vlastnostem modelu, vrací se algoritmus k dosud nejlepší dosažené variantě, která je uložena v paměti.

V průběhu kalibrace jsou postupně měněny následující části modelu: matice báze pravidel, parametry funkcí možnosti a váhy jednotlivých pravidel.

6.2.1 Matice báze pravidel

Matice báze pravidel jednoznačně přiřazuje určité kombinaci množin na vstupech výstupní množinu. Rozměry matice jsou dány počtem vstupů a výstupů a počtem užitých funkcí možnosti pro popis jednotlivých univers. Základní struktura modelu (obr. 6.1) umožňuje použití jednoduché matice báze pravidel, která popisuje všechny kombinace 2 vstupních veličin a přiřazuje jim hodnotu na 1 výstupu. V případě užití 20 funkcí pro popis univers se pak matice skládá z $20^2 = 400$ řádků.

V průběhu modifikace matice báze pravidel je měněn vektor konsekventu, tedy sloupec matice, který na každém řádku přiřazuje kombinaci vstupů množinu na výstupu. Na počátku kalibrace modelu je použita základní (subjektivně sestavená) matice báze pravidel. Modifikace matice báze pravidel probíhá pomocí užití náhodných čísel. V každém cyklu jsou u náhodně zvoleného počtu řádků náhodně měněny hodnoty konsekventu vždy o jednu hodnotu (nahoru či dolů). Vede-li modifikovaný tvar vektoru konsekventu k lepším vlastnostem modelu dle kriteriální funkce, je nový tvar vektoru uložen do paměti a je s ním pracováno v dalším kroku. V opačném případě dojde k navrácení k původnímu tvaru.

Počáteční tvar dané matice báze pravidel rovněž zohledňuje pořadí inferenčního systému ve spodní větvi (obr. 6.1) – s rostoucí délkou řetězce roste i váha hodnoty množiny na vstupu (kterou je v takovém případě pomocná veličina *out*).

Výsledný tvar modifikované matice báze pravidel je zpravidla velmi rozdílný od počátečního tvaru matice. Nicméně předchozí práce ukázaly, že dobře sestavený počáteční tvar této matice má pro úspěch následné optimalizace nemalý význam.

6.2.2 Parametry funkcí možnosti

Universa všech použitých veličin jsou popsána pomocí funkcí možnosti. Při sestavování modelu a postupných pokusech o jeho kalibraci se ukázalo jako nejvýhodnější použití gaussovského tvaru funkcí možnosti. S rostoucím počtem funkcí se zlepšuje popis univers, což vede ke zlepšení výsledku kalibrace (dle zvolené kriteriální funkce), zároveň však s rostoucím počtem těchto funkcí roste i složitost modelu (počet řádků matice báze pravidel) a nároky na výpočetní techniku a dobu kalibrace modelu.

Modifikace parametrů funkcí možnosti opět probíhá pomocí náhodných čísel, přičemž jsou do algoritmu zahrnuta určitá omezení, aby nedocházelo například k překrytí středů jednotlivých zvonů či k příliš velkému oddálení jednotlivých vrcholů, což by vedlo k nerovnoměrnému popisu univers a znehodnocení výstupů.

Otázka volby typu a počtu použitých funkcí možnosti nebyla jednoznačná. V průběhu prací na konstrukci modelu byly nejprve používány funkce trojúhelníkového tvaru, později lichoběžníkové a nakonec bylo rozhodnuto o použití funkcí možnosti gaussovského tvaru.

Zvolený počet popisujících funkcí a volba jejich parametrů ovlivňuje celkový popis každého universa. Snaha byla o dostatečné pokrytí celého universa. Finální verze modelu pracuje se 20 funkcemi možnosti na každém universu.

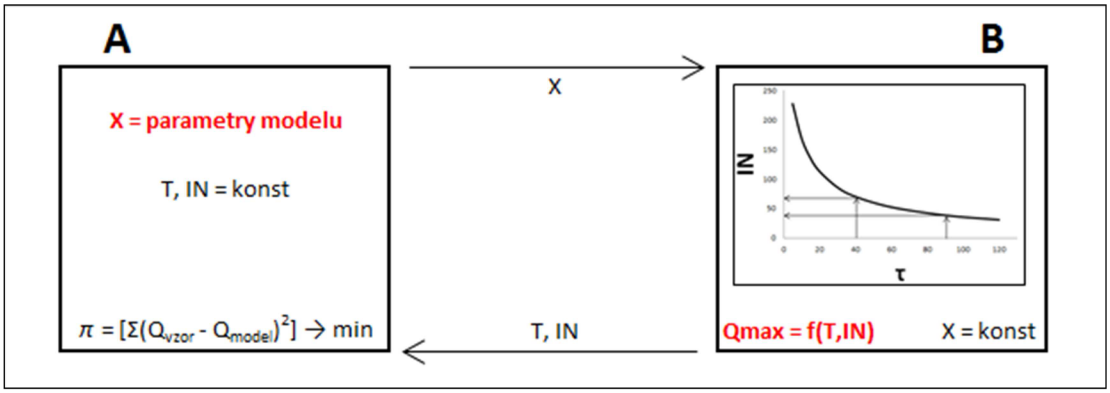
Kombinace parametrů funkcí možnosti a jednoznačné přiřazení výstupní množiny dané kombinaci množin na vstupech, které je definováno v matici báze pravidel, tvoří základní rozhodovací mechanismus pro určení výstupní hodnoty. Tento rozhodovací mechanismus lze graficky zobrazit pomocí tzv. řídicí plochy. Každý inferenční systém v sekvenci dle základního schématu má svou řídicí plochu, která je v průběhu optimalizačního procesu kalibrace postupně modifikována tak, aby postupně docházelo k extremalizaci kriteriální funkce. Ze svého počátečního stavu postupně přechází do optimalizovaného tvaru. Ukázky řídicích ploch sestaveného modelu jsou uvedeny v samotném textu disertační práce.

6.2.3 Váhy jednotlivých pravidel

V průběhu kalibrace modelu dochází také k optimalizaci vah jednotlivých pravidel. Matice báze pravidel obsahuje také sloupec, který určuje váhu každého pravidla (řádku matice). Váhy pravidel se pohybují na intervalu [0 1], přičemž je-li váha blízká nule, je daná kombinace potlačena a v rozhodovacím mechanismu ztrácí tato kombinace vliv na konečný výsledek. Touto cestou lze potlačit či vytěsnit nežádoucí či nereálné kombinace vstupů, například extrémně intenzivní déšť o dlouhé době trvání. V této fázi dochází k aplikaci teorie možnosti a rozšíření klasického fuzzy modelu o tuto teorii.

6.2.4 Postupná optimalizace

Celý proces sestavování modelu a jeho kalibrace je zkomplikován skutečností, že část dat ze vzorové matice není předem známa. Jedná se o dvojici vstupů doby trvání *T* příčinného přívalového deště a jeho intenzity *IN*. Proto byl do algoritmu kalibrace zahrnut blok, který pro každý řádek vzorové matice (každé povodí) vyhledá nejméně příznivou kombinaci veličin *T* a *IN*. Pojmem *postupná optimalizace* se pak rozumí zahrnutí tohoto bloku do původního algoritmu kalibrace modelu. Schéma celého procesu postupného hledání kritické dvojice veličin *T* a *IN* je uvedeno na obr. 6.2:



Obr. 6.2 *Schéma postupné optimalizace*

Proces kalibrace se skládá ze dvou bloků – *A* a *B*; V bloku *A* jsou pro daná vzorová data (s počáteční a v tomto bloku neměnnou kombinací srážkových vstupů *T* a *IN*) hledány optimální vlastnosti modelu, které jsou ve schématu označeny neznámou *X*. Hodnota *X* (parametry modelu) je následně předána do bloku *B*. V bloku *B* nedochází k modifikaci dílčích částí modelu (matice báze pravidel, váhy pravidel a parametry funkcí možnosti nejsou měněny), ale je zde na zvoleném intervalu vyšetřována oblast veličin *T* a *IN* tak, aby byla nalezena nejméně příznivá kombinace vstupů *T* a *IN* – tedy taková kombinace, kdy dochází k maximálnímu odtoku *Q*. Algoritmus bloku *B* je sestaven tak, že pro každý řádek matice vzorových dat je vyhledána nejbližší srážkoměrná stanice daného povodí a z Truplových tabulek je dohledána intenzitní křivka o příslušné periodicitě. Z křivky jsou odečítány dvojice vstupů *T* a *IN* a jsou dopočteny všechny hodnoty výstupů *Q*. Časy *T* a intenzity *IN*, které způsobí maximální odtok *Q* z povodí, jsou pak zpětně předány jako upravený vstup (upravená matice vzorových dat) do bloku *A*, kde dochází k opakované optimalizaci dle kriteriální funkce π. To se opakuje, dokud v obou optimalizačních blocích opakovaně nedojde k nalezení lepšího tvaru modelu či nalezení nové kombinace vstupů *T* a *IN*.

Uvedeným způsobem jsou na zvolené testovací oblasti postupně hledány kritické doby deště a jim odpovídající náhradní intenzity na jednotlivých povodích. V průběhu kalibrace je tedy dohledávána část samotných vzorových dat.

6.2.5 Kriteriální funkce

Sestavení vhodné kriteriální funkce má zásadní vliv na úspěch kalibrace a celého procesu sestavování modelu. Pro vyhodnocování úspěšnosti kalibrace bylo primárně sledováno, zda se shodují modelové kulminační průtoky s odpovídajícími průtoky z matice vzorových dat. Pro tyto účely byly sestaveny kriteriální funkce π_1 a π_2:

$$\pi_1 = \sum_{i=1}^{n} \left(Q_{m,i} - Q_{v,i}\right)^2,$$

$$\pi_2 = \sum_{i=1}^{n} \left| 1 - \frac{Q_{m,i}}{Q_{v,i}} \right|,$$

kde $Q_{m,i}$ představuje modelový kulminační průtok *i*-tého povodí dat, $Q_{v,i}$ odpovídající kulminační průtok z matice vzorových dat a *n* celkový počet řádků matice vzorových dat. V oblasti vyšších průtoků má vyšší účinnost kriteriální funkce π_1, v oblasti nižších průtoků pak funkce π_2.

Dále byla sestavena kriteriální funkce, která hodnotí míru vlivu jednotlivých vstupujících veličin na výstupní hodnotu. V průběhu testování se ukázalo, že modifikace dílčích částí modelu nelze vázat pouze na vztah výstupních modelových průtoků a odpovídajících kulminačních průtoků ze vzorových dat. Docházelo totiž k situaci, kdy se sice model z tohoto hlediska jevil jako velmi dobrý (korelace těchto veličin byla velmi vysoká), ale při podrobnějším testování bylo zřejmé, že úspěch je pouze částečný; Při testování, zda s rostoucím úhrnem příčinného deště roste i odtoková reakce povodí, se ukázalo, že tomu tak není vždy. Proto byly mezi kriteriální funkce zařazeny další, pro tyto účely odvozené. Jinými slovy lze říci, že do procesu kalibrace byla zařazena určitá forma citlivostní analýzy, přičemž vyčíslení jejího výsledku představuje další kritérium.

Zahrnutím více kriteriálních funkcí přechází problematika kalibrace modelu do multikriteriální optimalizace. V každém cyklu optimalizace jsou porovnány dosažené hodnoty kriteriálních funkcí s dosud nejlepšími hodnotami, kterých bylo dosaženo v předchozích krocích. Pokud bylo novou modifikací ve všech kriteriálních funkcích dosaženo lepších (nebo stejných) hodnot než kdykoli předtím, je tato varianta modelu uložena do paměti a nově získané hodnoty pak slouží pro porovnávání v dalších cyklech. Volba (jedné či více) vhodné kriteriální funkce má pro úspěšnost kalibrace zásadní význam.

6.2.6 Oblast mimo maximální odtoky při známé N-letosti

Konstrukce modelu a jeho následná kalibrace se primárně soustřeďuje na oblast kulminačních průtoků. Model pracuje se dříve zpracovanou množinou malých povodí a pomocí optimalizačního postupu hledá kritickou dvojici vstupů doby trvání *T* a intenzity *IN*. Užitím všech uvažovaných vstupních veličin dochází k výpočtu výstupní veličiny, kterou je předpokládaný (modelový) kulminační průtok. Výstupní hodnota představuje nejméně příznivou kombinaci dešťových vstupních veličin v tom smyslu, že sledované povodí bylo zasaženo právě takovým přívalovým deštěm, kdy doba trvání tohoto deště je rovna době koncentrace a zároveň je tímto deštěm zasaženo celé povodí. Intenzita deště je odvozena z Truplových závislostí pro nejbližší známou srážkoměrnou stanici a zpracovávanou N-letostí události.

Pro účely sestavení mapové aplikace, která je popsána níže, je však nutné určit, jak se bude model chovat v případě, kdy povodí zasáhne déšť o jiné době trvání (resp. intenzitě) než kritické.

Bližší postup odvození odtokové reakce mimo oblast kritického deště je v samotném textu disertační práce. Pro určení reakce v této oblasti byla provedena rozsáhlá analýza v programu *DesQ-MAX Q* (Hrádek, 1998). V této analýze bylo zpracováno 80 povodí. Bylo pracováno ve výpočetní variantě *II*, kdy je počítána hodnota maximálního průtoku při zadané době trvání deště a době opakování deště (N-letosti). U každého povodí byla zadána série různých dob trvání deště a sledována vypočtená hodnota kulminačního průtoku.

6.2.7 Varianty modelu pro různé N-letosti

Množina vzorových dat pro kalibraci modelu obsahuje dešťové epizody v různých variantách doby opakování. Pro sestavení modelu bylo použito 7 N-letostí v rozmezí 1 rok až 100 let. Model je sestaven a následně kalibrován tak, že pro každou z uvažovaných N-letostí je vytvořena samostatná varianta modelu. Model tak pracuje v určitých vrstvách a pro následný výpočet v koncové aplikaci použije vždy příslušnou vrstvu (či dvě nejbližší) podle toho, jaké průměrné době opakování odpovídají parametry uvažovaného zatěžovacího deště. Kalibrace modelu tedy probíhá postupně pro všechny N-letosti. Tyto variantní vrstvy musejí být vytvořeny ve všech inferenčních systémech, které pracují (přímo nebo následně) s dešťovými parametry. Jedná se o inferenční systémy, jejichž výstupy jsou schematicky označeny *out3* a *out4* (obr. 6.1). Celkově je tedy při sestavování a následné kalibraci modelu vytvořeno 16 inferenčních systémů (1 + 1 + 7 + 7).

7 APLIKACE

7.1 VZOROVÁ DATA

Užití modelu se předpokládá v oblasti preventivní ochrany, proto byla pro kalibraci modelu použita odvozená vzorová data[1] (v případě operativní předpovědi by bylo žádoucí užití reálných dat). Byl přijat předpoklad, že déšť o určité N-letosti způsobí odtok o téže N-letosti a zároveň lze tento déšť popsat pomocí dvou veličin, a to dobou trvání a intenzitou (je pracováno s náhradní intenzitou deště). Jedná se o poměrně významné zjednodušení, ale vzhledem k tomu, že přívalové deště postihují plošně malá povodí, doba trvání těchto dešťových epizod je krátká (maximálně v řádu hodin) a celkové množství nejistot vstupujících veličin je značné, se považuje za přijatelné.

Matice vzorových dat obsahuje hodnoty vstupních a výstupních veličin, které jsou použity pro kalibraci modelu. Při popisu vstupních veličin se jedná o veličiny popisující geografii sledovaných povodí a parametry příčinného přívalového deště. Výstupní veličinou je odtoková reakce ve formě hodnoty kulminačního průtoku, jakožto odezvy daného malého povodí na daný přívalový déšť. Pro odvozování vzorových dat byl použit postup, který je zevrubněji popsán v samotném textu disertace v příslušné kapitole. Pro zpracování této matice bylo využito rozsáhlé databáze hydrologických posudků ČHMÚ a Truplových tabulek (Trupl, 1958).

Kalibrace modelu probíhala v několika variantách ve vztahu k souboru vzorových dat; jednak byly použity odvozené srážkové epizody pouze s jednou dobou opakování rovnou 100 letům, jednak byly použity události i o jiných N-letostech (1, 5, 10, 20, 50 let).

[1] Pojem *odvozená data* je zde používán, protože část matice vzorových dat, která se zabývá parametry příčinného deště, byla odvozena na základě vybraných vlastností povodí a dat z dlouhodobého pozorování dešťů. V případě použití dat z reálných dešťových epizod by tyto veličiny byly přímo měřeny. Bližší popis postupu odvozování je uveden v následujícím textu.

Počet sloupců vzorové matice je roven celkovému počtu vstupních/výstupních veličin. Počet řádků matice je dán počtem srážkových epizod a počtem uvažovaných povodí. Pro kalibraci modelu bylo použito 184 povodí. Všechna leží v oblasti místní působnosti brněnské pobočky ČHMÚ.

7.2 KALIBRACE A VALIDACE MODELU

Pro účely ověření úspěšnosti sestavení modelu a jeho kalibrace byla celá matice vzorových dat náhodně rozdělena v poměru 2:1 (tedy 123 a 61 povodí). V několika případech dojde k tomu, že model bude validován na vstupních datech, která jsou mimo rozsah intervalů, na kterých proběhla kalibrace. V dosažených výsledcích pak bude možné vidět, jak model na taková data reaguje.

7.3 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

Kromě schopnosti modelu nalézt hodnotu kulminačního průtoku na jednotlivých povodích byla při vyhodnocování úspěšnosti kalibrace modelu sledována i jeho schopnost adekvátně a logicky reagovat na měnící se hodnoty vstupních veličin. Jinými slovy lze říct, že jednotlivé varianty modelu byly testovány na citlivost na jednotlivé vstupní veličiny.

Pro účely takového druhu testování modelu byla sestavena umělá matice vstupních dat. Pomocí souboru záměrně zvolených hodnot vstupních charakteristik bylo sledováno, zda model vhodným způsobem reaguje na data, která nejsou součástí vzorové matice. Je sledován vliv všech vstupních veličin na výslednou hodnotu modelového průtoku. Pro tyto účely byl záměrně vytvořen soubor vstupních veličin tak, aby vždy byl patrný vliv právě jedné sledované veličiny. Jedná se o určitou formu citlivostní analýzy modelu, která byla prováděna ve dvou variantách: jednak byla sledována citlivost modelu na měnící se hodnoty geografických vlastností povodí (spodní větev dle schématu na obr. 6.1), jednak byla sledována reakce modelu na rostoucí srážkové parametry (horní větev). Bližší popis principu citlivostní analýzy je k dispozici v nezkrácené verzi disertace.

7.4 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

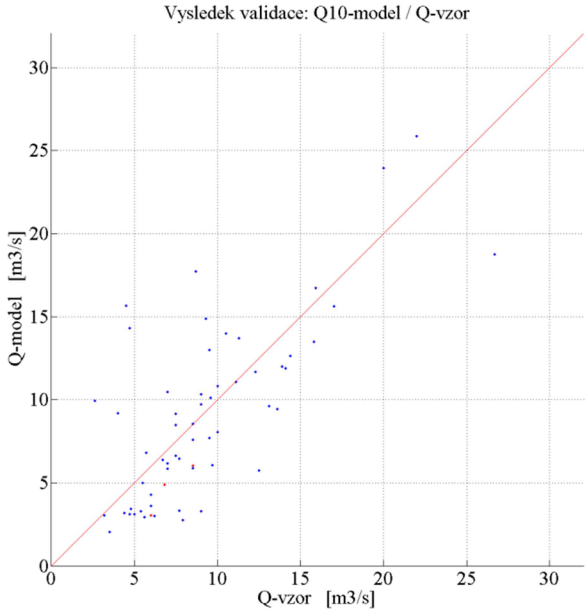
V kapitole jsou uvedeny dosažené výsledky ve dvou podkapitolách. Jednak jsou zde uvedeny výsledky kalibrace a následné výsledky validace modelu při náhodném rozdělení množiny dat v poměru 2:1, a jednak výsledky po kalibraci celé množiny dat, která čítá 184 povodí, a které jsou podkladem pro sestavení konečné mapové aplikace. V prvním případě je cílem ukázat, že daným způsobem je možné k problematice přistupovat a model je schopen dobře reagovat na data, která nejsou součástí kalibrace. V druhém případě je pak snaha zevrubně popsat, na jakých datech je postavena finální aplikace. Souhrnný komentář k jednotlivým výsledkům následuje v kapitole Shrnutí výsledků.

Při procesu sestavování a kalibrace modelu dochází k náhodným obměnám na omezených intervalech, což má za následek to, že jednotlivé výsledky jsou mezi sebou rozdílné, byť byly dosaženy stejným postupem (algoritmem). Charakter výsledků je napříč výpočty podobný, ale občas dojde k situaci, kdy jeden z výsledků (či jeho část) vybočuje a celý výsledek zkreslí či znehodnotí. Proces kalibrace

modelu tak nelze plně zautomatizovat a vždy je nutné provést sérii výpočtů a z nich následně vybrat výsledek, který nejlépe vyhovuje skupině sledovaných kritérií.

7.4.1 Validace modelu při rozdělení dat v poměru 2:1

Následující graf představuje výsledek validace modelu pomocí tzv. kontrolního kvadrantu, tedy srovnání modelových průtoků (na svislé ose) s průtoky z matice vzorových dat. Každý bod reprezentuje jedno z 61 povodí. Ideální stav je naznačen červenou diagonálou (nejedná se o proloženou lineární regresní křivku vykreslených bodů). Je zde uvedena varianta pro N-letost rovnou 10 letům. Výsledky v případě ostatních použitých N-letostí jsou podobné. Červené body představují povodí (tedy řádky vstupní matice validační množiny), kdy alespoň jeden ze vstupů nabývá hodnot mimo interval kalibrace. Je tedy možné vidět, jak se model vypořádá se situací, kdy musí provádět extrapolaci mimo kalibrační prostor.

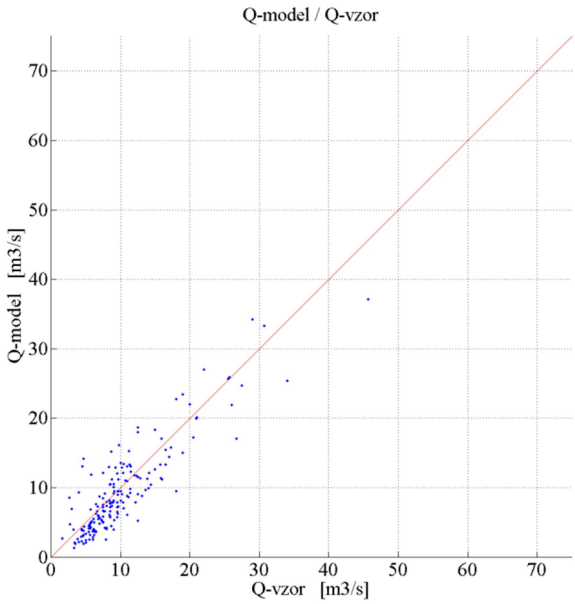


Obr. 7.1 *Výsledek validace modelu – 61 povodí, N = 10 let*

Více výsledků validace modelu je k dispozici v rozšířené verzi disertační práce.

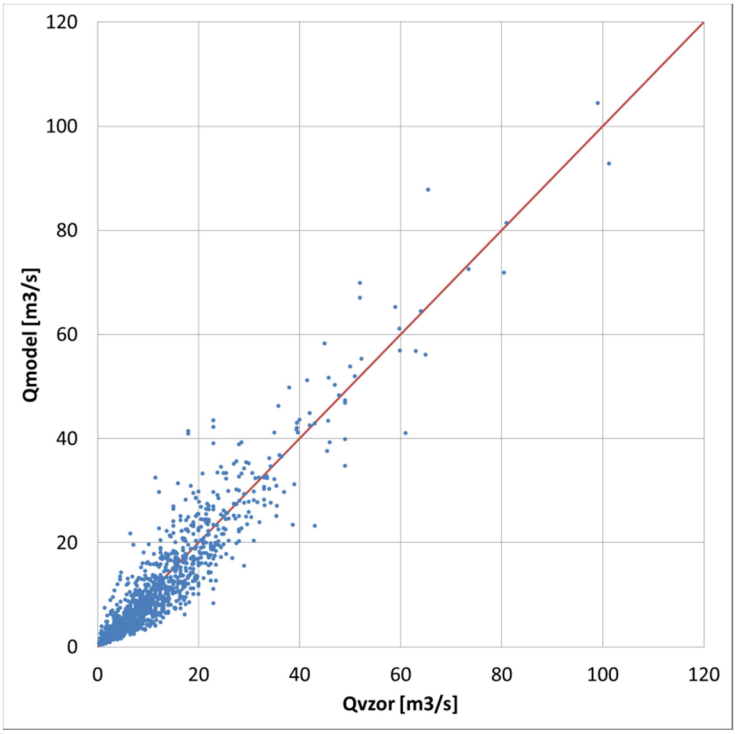
7.4.2 Kalibrace celé množiny dat – podklad pro mapovou aplikaci

Podkapitola obsahuje výsledky, kterých bylo dosaženo při sestavování koncové aplikace na základě celé matice vzorových dat, která obsahuje všech 184 povodí. Výsledky, které jsou zde zobrazeny, představují finální podobu modelu, který tvoří jádro mapové aplikace.



Obr. 7.2 *Vztah modelového a vzorového průtoku – 184 povodí, N = 10 let*

Pro sestavení modelu byla použita matice vzorových dat, která obsahuje odvozené srážkové údaje pro 7 různých N-letostí v rozpětí 1 až 100 let. Ve výše uvedených grafech jsou pro přehlednost uváděny výsledky vždy pouze pro jednu vybranou dobu opakování. Jsou-li vykresleny všechny epizody pro všechny uvažované doby opakování vykresleny do jednoho grafu, je v diagramu dohromady 184×7 = 1288 bodů.



Obr. 7.3 *Vztah modelového a vzorového průtoku – 184 povodí, všechny N-letosti*

7.5 MAPOVÁ APLIKACE

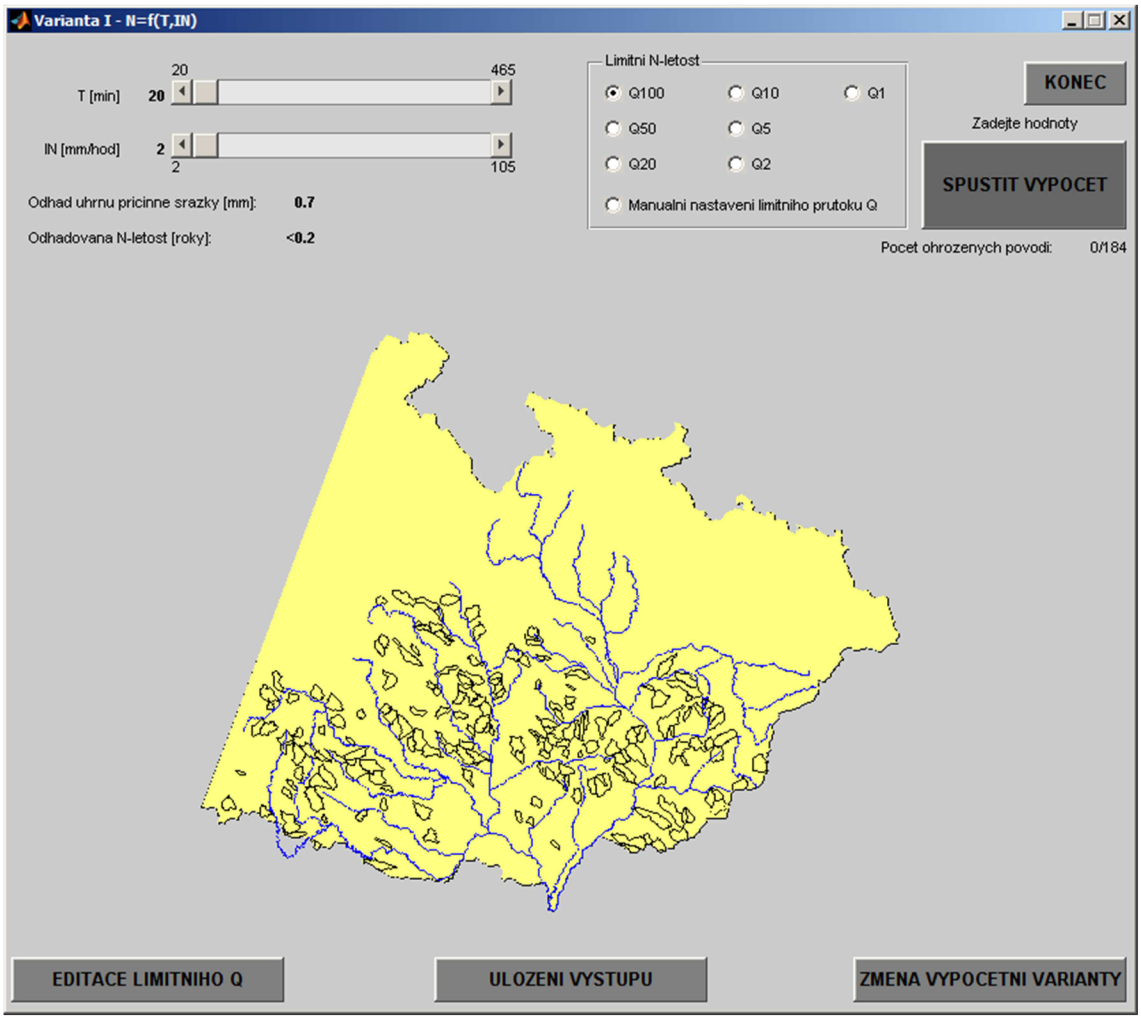
7.5.1 Datové matice

Koncová mapová aplikace je koncipována tak, že uživatel zatěžuje uzavřenou množinu 184 povodí zvolenými srážkovými parametry. Uživatel může volit hodnoty vstupních dešťových parametrů, přičemž se jedná o kombinaci třech veličin: doba trvání *T*, intenzita *IN* a průměrná doba opakování *N*. Při každé zadané kombinaci těchto parametrů dochází k výpočtu a porovnání modelové odtokové reakce s limitní hodnotou průtoku na každém z testovaných povodí. Z důvodu snížení doby výpočtu (v každém kroku zadání vstupních veličin) bylo nutné připravit tzv. datové matice pro jednotlivá testovaná povodí. Jinými slovy byly pro každé povodí připraveny rozsáhlé třírozměrné matice, které obsahují vstupně-výstupní hodnoty. Primárním důvodem vytvoření těchto matic je rychlost reakce na výpočtové tlačítko v grafickém uživatelském prostředí koncové mapové aplikace. Vstupním hodnotám parametrů *T* a *IN* této matice je přiřazena konkrétní hodnota výstupní odtokové reakce povodí *Q*, a to pro jakoukoli hodnotu na vstupech. Byla předpřipravena matice hodnot *Q* pro libovolnou dvojici vstupů *T* a *IN*. V grafickém prostředí pak nedochází k výpočtům v sekvencích celého systému modelu dle obr. 6.3, ale pouze k nalezení příslušné hodnoty v prostoru $T \times IN \times Q$. Přesnost (jemnost) celé této matice pak může být zvolena dle uvážení; zde bylo uvažováno vždy 50 hodnot na každém ze vstupních univers. Pro každé povodí má pak tato datová matice $50 \times 50 = 2500$ hodnot. Pro každé povodí je vytvořena unikátní a neměnná datová matice, se kterou je pracováno v následné mapové aplikaci.

7.5.2 Samotná mapová aplikace

Konečným výstupem výše popsaných prací je vytvořená mapová aplikace. Jedná se o samostatně spustitelnou aplikaci s vlastním uživatelským rozhraním, která pracuje s dříve vytvořenými datovými maticemi a uživatelem zadanými dešťovými parametry. Grafické uživatelské prostředí aplikace bylo vytvořeno v programovém prostředí MATLAB, stejně jako hlavní algoritmy modelu. Aplikace slouží k plošnému testování množiny malých povodí návrhovými dešti o zvolených parametrech. Po spuštění programu uživatel volí jednu ze čtyř výpočetních variant. Varianty jsou určeny kombinacemi vstupních dešťových parametrů. Je pracováno s následujícími veličinami: průměrná doba opakování *N* [roky], intenzita deště *IN* [$mm.hod^{-1}$], doba trvání deště *T* [min], resp. T_{krit} [min]. Jednotlivé varianty (*I-III*) jsou určeny vždy kombinacemi uvedených veličin, přičemž uživatel může volit 2 z nich a třetí je určena logickou závislostí. U varianty *IV* uživatel volí pouze N-letost návrhového deště.

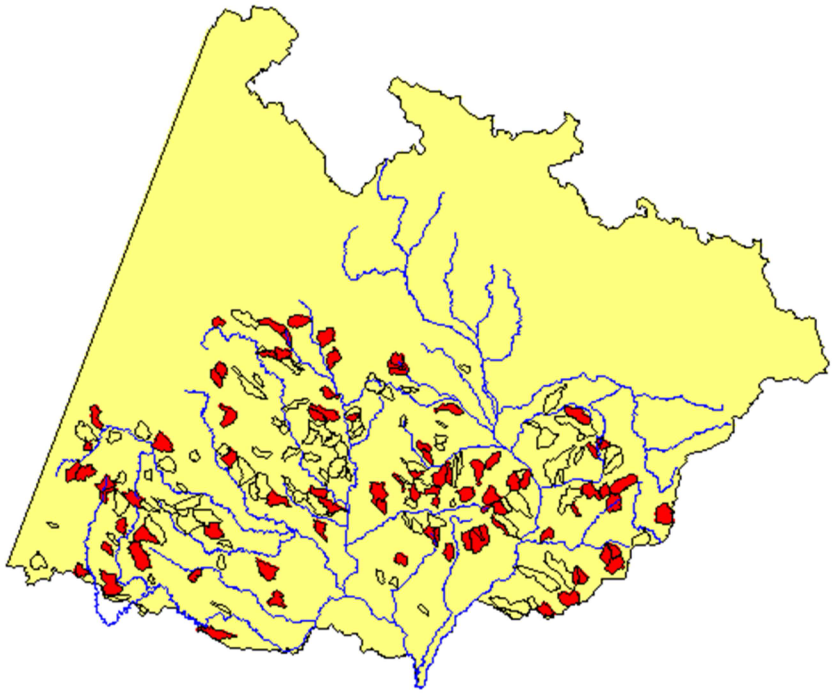
Výběrem zvolené varianty dojede k otevření výpočtového okna. Okno je rozděleno do dvou částí; v horní části uživatel zadává vstupní parametry a volí nastavení výpočtu. Spodní část je pak tvořena mapou s vyznačenými povodími, která jsou testována.



Obr. 7.4 *Výpočtové okno Varianty I*

Při zvolené první variantě výpočtu uživatel pomocí ovládacích prvků volí parametry zatěžovací. Algoritmus aplikace dopočte příslušný úhrn srážky a odhadne průměrnou dobu opakování definované srážky. Pro tento odhad je použita Truplova závislost pro průměr celého povodí Moravy a Odry tak, jak jsou uvedeny v tabulkách (Trupl, 1958). Ve všech výpočetních variantách uživatel volí limitní N-letost pro testovaná povodí. Tato hodnota může být určena plošně pro celou množinu 184 povodí nebo individuálně.

Po zadání vstupních parametrů zátěžového deště a hodnoty limitního průtoku na testovaných povodích lze spustit samotný výpočet. V této fázi (po stisknutí výpočtového tlačítka) algoritmus aplikace pracuje s předem připravenými datovými maticemi, jejichž tvorba byla popsána dříve. Z datové matice každého povodí je vybrána příslušná hodnota modelového kulminačního průtoku Q a ta je porovnána s limitní hodnotou sledovaného povodí. Je-li hodnota limitního průtoku povodí překročena modelovým kulminačním průtokem, je takové povodí označeno za potenciálně ohrožené a v mapě výpočtového okna je barevně zvýrazněno.



Obr. 7.5 *Ukázka ohrožených povodí po výpočtu*

Další výpočetní varianty (*II*, *III* a *IV*) obnášejí určitou obměnu v zadávání vstupních dešťových parametrů v horní části uživatelského prostředí. Navíc je zde přidána volba, ve které může uživatel určit, zda bude množinu povodí zatěžovat parametry pro průměrné deště povodí Moravy a Odry, nebo budou dešťové parametry odvozeny vždy pro nejbližší srážkoměrnou stanici pro každé povodí.

Ve čtvrté variantě uživatel volí pouze N-letost zátěžového deště. Za dobu trvání deště je u všech povodí dosazena hodnota T_{krit} (nejméně příznivá hodnota). Intenzita *IN* je pak odvozena na základě logické závislosti.

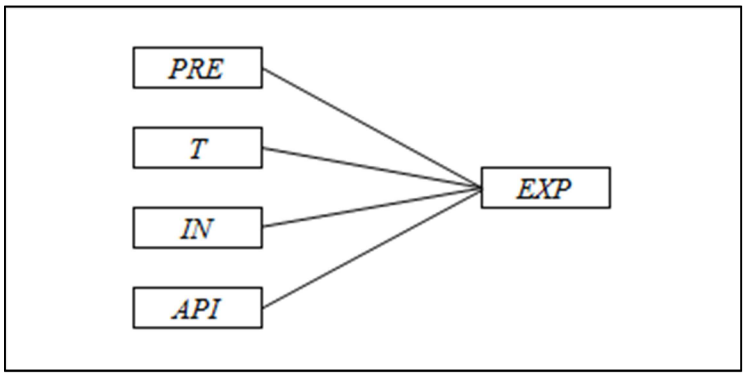
7.6 UŽITÍ VÝSTUPŮ V POLOPROVOZU OPERATIVNÍHO MODELU ČHMÚ

Sestavený model byl v upravené podobě použit pro účely provozu operativního předpovědního fuzzy modelu. Cílem bylo pokusit se využít výstupy z výše popsaného modelu i v jiném typu aplikace než pro tzv. off-line hledání ohrožených povodí. Snahou bylo vytvořit jakýsi podpůrný prostředek pro operativní hledání ohrožených lokalit při kontinuálním zpracovávání dat z radarových odrazů, a to ve formě jednoho ze vstupů do vytvářeného modelu. Tento vstup je označen *PRE* a má představovat určitou predispozici pozorovaného povodí ke vzniku povodňového ohrožení. Model pro operativní předpověď ohrožení povodí přívalovými povodněmi je v současné době provozován v poloprovozním režimu brněnské pobočky ČHMÚ. Jedná se o fuzzy model, který pracuje s aktuálními hodnotami z radarových odrazů. Model pracuje se čtyřmi vstupními veličinami a jednou výstupní veličinou, která udává míru aktuálního potenciálního ohrožení povodněmi z přívalových dešťů.

Vstupní veličiny, tak jak jsou uvedeny na schématu (obr. 7.6), jsou následující:

- *PRE* – hodnota potenciálního ohrožení povodí; je určena předchozím zpracováním jednotlivých povodí pomocí modelu popsaného v této práci,

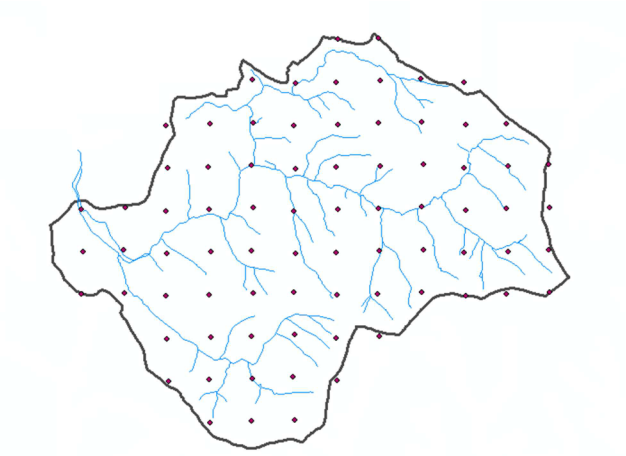
- *T* – doba trvání deště, překročí-li hodnota intenzity předepsanou mez,
- *IN* – intenzita deště nad stanovenou limitní hodnotou,
- *API* – hodnota indexu, který charakterizuje nasycení povodí předchozími srážkami; je vypočtena na základě předchozích měřených srážek na povodích.



Obr. 7.6 *Základní schéma modelu pro operativní předpověď*

Je zde kladen důraz na jednoduchost modelu, aby časová náročnost výpočtu byla co nejmenší, protože výpočty probíhají ve stejném časovém kroku, jako jsou k dispozici údaje z radarů. V každém běhu je pracováno s předpovědí srážek několika předpovědních produktů. Jsou zpracovávána data o deštích za poslední 3 hodiny (měření) a předpověď na 2 hodiny dopředu. Toto 5hodinové období je vyhodnoceno a na základě analýzy dat jsou určeny hodnoty dešťových vstupních veličin *T* a *IN*. Hodnota vstupu *API* je určena na základě měření srážek z předchozích 14 dní a klouzavě se mění dle nově dostupných dat. Výstupní veličina *EXP* představuje ohroženost povodí v daném okamžiku. Hodnota vstupu *PRE* se mezi jednotlivými běhy modelu nemění a je upravována v delších časových krocích na základě zpětné analýzy úspěšnosti modelu.

V každém cyklu je zpracován balík dat, který obsahuje mřížku s hodnotami radarových odrazů o velikosti 728×528 bodů. Pro každé povodí je z těchto bodů určena průměrná hodnota veličin *T* a *IN* (obr. 7.7). Bližší postup kalibrace modelu je nad rámec předložené disertační práce a bude publikován později.



Obr. 7.7 *Průnik bodů s radarovými daty a sledovaného povodí*

8 SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ

Základním způsobem pro hodnocení úspěšnosti sestavení modelu a jeho kalibrace bylo vykreslení tzv. kontrolního kvadrantu – tedy zobrazení vztahu výstupního modelového kulminačního průtoku a odpovídajícího kulminačního průtoku ze vzorových dat. V předchozí kapitole je uvedena skupina grafů, která ukazuje tento typ výsledků ve dvou variantách. V prvním případě se jedná o validaci po rozdělení množiny povodí na kalibrační a validační množinu. Cílem je ověřit, zda a jak model reaguje na data, která nejsou součástí vzorových dat. Náhodné rozdělení celé množiny povodí do dvou skupin toto umožňuje, včetně toho, že dochází k situaci, kdy jsou při validaci překročeny některé intervaly univers vstupních veličin a model je nucen provést extrapolaci mimo kalibrační prostor.

Tab. 8.1 *Tabulka korelací*

N-letost [roky]	1	2	5	10	20	50	100
$r_{123\text{-}61}$ [-]	0.83	0.82	0.78	0.78	0.79	0.81	0.81
r_{184} [-]	0.85	0.85	0.87	0.90	0.90	0.90	0.90

Tab. 8.1 uvádí soupis dosažených koeficientů korelace r při vykreslení kontrolních kvadrantů všech použitých N-letostí vzorových epizod. Řádek označený $r_{123\text{-}61}$ uvádí výčet koeficientů při validaci modelu (kalibrace na 123 povodích, validace na zbývajících 61). Podstatnou věcí při analýze charakteru těchto výsledků je i fakt, že body v uvedených grafech leží celkem rovnoměrně okolo naznačené úhlopříčky, která svírá s osami úhel 45°. Dalším pozitivem je, že žádný z bodů při validaci modelu neleží výrazně mimo oblast předpokládaných výsledků, a to ani v situaci, kdy se mezi vstupními veličinami objeví hodnota, která leží mimo interval kalibrace dané veličiny. To značí, že model má schopnost generalizace a dokáže v dané situaci reagovat konzistentně a relativně spolehlivě, což u některých metod umělé inteligence (např. neuronové sítě) není samozřejmostí.

Dosažené hodnoty korelace modelových a vzorových průtoků po kalibraci modelu na celé 184členné množině jsou sepsány v řádku označeném r_{184}. Je logické, že tyto hodnoty jsou vyšší než při validaci modelu, protože model se v průběhu sestavování a kalibrace učí na všech datech, která jsou následně použita pro sestrojení koncové aplikace. Tyto výsledky mají ukazovat na kvalitu výsledků, které vykazuje model použitý pro koncovou mapovou aplikaci.

Uvedený typ výstupů z modelu tvoří základní kostru pro odhad odtokové reakce malého povodí při zadání libovolné kombinace vstupních dešťových parametrů. Výsledky ukazují, že model je schopen dostatečně odhadnout hodnoty kulminačních průtoků o konkrétně zadaných N-letostech. Zároveň je však potřeba, aby algoritmus byl schopen dostatečně pracovat v oblastech mezi uvedenými N-letostmi, případně pod hodnotou nejnižší uvažované N-letosti pro kalibraci (Q_1) a nad hodnotou nejvyšší uvažované N-letosti (Q_{100}). Výstupní hodnoty v těchto oblastech jsou dány určitými interpolačními postupy. Předpokládá se, že základní oblastí použití modelu a následné aplikace bude v oblastech mezi Q_1 a Q_{100}, protože zde velmi pravděpodobně dochází k překročení hodnot mezních průtoků jednotlivých povodí

a následnému ohrožení přívalovými povodněmi. V této oblasti model interpoluje mezi hodnotami, které jsou dány řídicími plochami jednotlivých inferenčních systémů na základě odhadované N-letosti příčinného deště. Základní mřížku hodnot N-letých průtoků, tvoří data z epizod o průměrné době opakování 1, 2, 5, 10, 20, 50 a 100 let.

Pro ověření určité konzistentnosti reakce modelu, a to také v souvislosti s interpolacemi mimo základní validací ověřenou mřížku, slouží tzv. citlivostní analýza. Její výsledky jsou k nahlédnutí v nezkrácené verzi disertační práce. Analýza zkoumá, jakým způsobem model reaguje na měnící se hodnoty jednotlivých vstupních veličin. Primárním požadavkem pro úspěšný výsledek této analýzy je, aby hodnota výsledného modelového průtoku vždy rostla s rostoucí hodnotou sledovaného vstupu. To s určitými výhradami platí. Výsledek citlivostní analýzy vlivu geografických vstupů ukazuje několik věcí; lineární průběh první křivky, která reprezentuje vliv plochy povodí na výslednou hodnotu průtoku Q, je logický a je dán základní strukturou modelu. U ostatních vstupů z této kategorie je jejich průběh dán tvarem řídicích ploch jednotlivých inferenčních systémů. Výsledek je uspokojující – směrem doprava odtoková reakce roste, nicméně dalo by se předpokládat, že vhodnější by byl hladší průběh. Sestavený algoritmus pracuje s určitými omezeními při sestavování matic báze pravidel tak, aby byly výrazně vyčnívající odlehlé oblasti na řídicích plochách pokud možno eliminovány. Nabízí se možnost provést po kalibraci modelu určité vyhlazení samotných řídicích ploch. Podobné mírné upravování dílčích částí modelu při jeho sestavování však vede k částečné odchylce od čistoty původního způsobu řešení, která se navíc nutně musí promítnout v každém dalším kroku výpočtu. Proto bylo rozhodnuto provést vyhlazení až u koncové části celého výpočetního cyklu, a to při tvorbě finálních datových matic pro každé testované povodí v mapové aplikaci. Danou věc ovlivňuje také fakt, že proces využívá náhodných čísel. Z charakteru výstupu z citlivostní analýzy lze také vyčíst celkovou míru vlivu jednotlivých vstupních veličin na výslednou hodnotu modelového průtoku Q.

Podobně lze nahlížet na výsledek druhé části citlivostní analýzy, která zkoumá míru vlivu dešťových parametrů. Zde však již dochází k situaci, kdy směrem doprava některé z křivek mírně klesají. To není příliš logické, protože analýza je konstruována tak, že povodí jsou zatěžována vždy rostoucími dešťovými vstupy. Tento jev je přisuzován dvěma vlivům: jednak se jedná o určitou nehladkost příslušných řídicích ploch (stejná příčina jako byla popsána v předchozím odstavci), jednak dochází k situaci, kdy je překročena nejvyšší N-letost (100 let) příčinného deště. V této oblasti se přechází od jednoho způsobu odvozování výsledné hodnoty průtoku (interpolace mezi vrstvami pro různé N-letosti) ke druhému (odvozování na základě řídicí plochy pro 100letou událost upravenou vybranými mechanismy). Toto nežádoucí chování v přechodové oblasti je však eliminováno následným vyhlazením prostoru datových matic při přípravě dat pro finální mapovou aplikaci.

Vyhlazené datové matice představují jakýsi mezičlánek mezi zkonstruovaným modelem a koncovou mapovou aplikací. Primárním účelem jejich vytvoření je

rychlost zpracování vstupních hodnot v mapové aplikaci. Datová matice slouží jako databáze vstupně-výstupních hodnot.

Z hlediska účelu následné aplikace je nejvýznamnější oblast v okolí Truplových intenzitních křivek (o zpracovaných N-letostech), protože právě zde většinou dochází k překročení mezní hodnoty průtoku u jednotlivých povodí. Rozsáhlá oblast mimo tyto křivky přísluší (odhadem) 1000leté vodě a výrazně vyšším N-letostem. Tuto oblast však model neřeší a hodnoty kulminačních průtoků Q jsou zde jen hrubě odhadnuty. Teorie možnosti umožňuje oblasti těchto nereálných kombinací vstupů vytěsnit a vyřešit je a po následné regulaci odhadnout hodnotu výstupu. Dojde-li při zadávání vstupních dešťových parametrů v závěrečné mapové aplikaci k posunu do této oblasti, je na to uživatel upozorněn.

Součástí sestavování a kalibrace modelu je i část, která se zabývá určením kritické doby trvání deště T_{krit}, tedy takové doby, která způsobí v místě uzávěrového profilu v kombinaci s příslušnou intenzitou právě největší kulminační průtok. Algoritmus tuto dobu dohledává pomocí vnořeného optimalizačního procesu, přičemž vychází z počátečního odhadu. Dle výsledků zobrazených v nezkrácené verzi disertační práce je patrné, že ve většině případů zůstává hodnota stejná nebo velmi podobná původní hodnotě. V několika případech pak dochází k postupné změně. V průběhu prací se ukázalo, že je velmi důležité vhodně omezit interval, na kterém má být dohledána modifikovaná doba T_{krit}. Od mechanismu postupné změny kritické doby trvání deště (a jí odpovídající intenzity) se očekává, že umožní modifikaci části matice vzorových dat tak, aby její tvar více odpovídal skutečnosti. Problémem však je ověření tohoto předpokladu pomocí samotného modelu, protože principiálně musí docházet k tomu, že model nejlépe reaguje na data, na kterých se učí. Tedy učí-li se na postupně měnících se datech, bude nejlépe reagovat na data, která vznikla na konci modifikačního procesu. Nedochází-li ke změně části datového souboru v průběhu tohoto učení, bude nejlépe reagovat na data, se kterými se učí celou dobu. Lze tedy říci, že zahrnutí postupné modifikace dílčí části matice vzorových dat je diskutabilní. Zároveň však lze říci, že rozdíl výsledků při zařazení této modifikace od situace, kdy modifikační blok v algoritmu zařazen není, je relativně malý a na výslednou funkci modelu a konečné mapové aplikace zásadní vliv nemá.

9 ZÁVĚR A PŘÍNOS PRO ROZVOJ VĚDECKÉ DISCIPLÍNY

Problematika přívalových dešťů a následných přívalových povodní je aktuální a je důležité se jí zabývat. Jednou z charakteristik přívalových dešťů je to, že se v našich zeměpisných šířkách mohou vyskytnout prakticky kdekoli. Jaké následky bude extrémní srážka mít na zasaženou lokalitu, pak závisí na mnoha faktorech, jako jsou vlastnosti říční sítě, typ povrchu (s tím související využití půdy), sklonitostní poměry, apod. K dané problematice lze v zásadě přistupovat dvěma způsoby. Na jedné straně je to operativní předpovídání aktuální míry ohrožení. V této situaci je pro úspěch zásadní kvalita meteorologické předpovědi příčinného deště. Předpovědní modely založené na operativním vyhodnocování předpokládaných úhrnů budoucích přívalových dešťů a aktuálního nasycení půdy se dnes běžně

používají a stále vylepšují. Druhý pohled na danou problematiku představuje předložená práce, kde jsou hledány a následně vyhodnocovány vazby mezi dlouhodobými srážkovými údaji a N-letými vodami. Principiálně jde o nalezení kauzálního vztahu mezi příčinným přívalovým deštěm o určité průměrné době opakování a kulminačním průtokem o téže N-letosti na sledovaných povodích. V práci jsou zpracovávány dlouhodobé datové podklady. Pro určení ohrožení malého povodí jsou zde dávány do vztahu modelový kulminační průtok a hodnota mezního průtoku pro posuzovanou lokalitu. Jiné aspekty jako riziko sesuvů půd či negativní erozní účinky přívalového deště zde nejsou brány v úvahu.

Pro sestavení modelu, který tvoří jádro celé práce, byly použity vybrané metody umělé inteligence, a to fuzzy logika a teorie možnosti. Bylo testováno i užití neuronových sítí. Tyto metody umějí dobře nakládat s veličinami značně zatíženými nejistotami. Jedná se zejména o veličiny, které popisují příčinný déšť a výslednou odtokovou reakci ve formě kulminačního průtoku. Cílem práce bylo poukázat na odlišný přístup k problematice vyhledávání malých povodí ohrožených povodněmi z přívalových dešťů (odlišný přístup od operativní předpovědi), a to za užití uvedených metod. Dosažené výsledky naznačují, že sestavený model je schopen adekvátně, logicky a konzistentně reagovat na vstupní data. Ověření funkčnosti modelu proběhlo na základě rozdělení množiny zpracovávaných povodí na kalibrační a validační množinu. Výsledky validace ukazují, že model je schopen dobře reagovat i na data, která nejsou přímo součástí sestavování a kalibrace modelu. Byla testována i situace, při které bylo sledováno, jak model reaguje na data, která jsou mimo prostor, na kterém proběhla jeho kalibrace. Obecně známou slabinou některých metod umělé inteligence je totiž právě tato situace – modely jsou schopné zpracovat pouze vstupy, jejichž hodnoty se pohybují v oblasti, na které se tzv. učí. Výsledek validace však ukazuje, že model je schopen extrapolace a na hodnoty mimo intervaly kalibrace dokáže reagovat logicky. Celková konzistentnost v chování modelu byla ukázána v citlivostní analýze. Tato pozitiva jsou přičítána jednak rozsahu matice vzorových dat, jednak robustnosti zvoleného typu řešení.

Použitý způsob řešení však neumožňuje řešení postupu povodňové vlny či určení vývoje povodňové situace uvnitř povodí. Sestavený model není dynamický. Výsledná hodnota se vždy vztahuje pouze k uzávěrovému profilu sledovaného povodí. K případnému řešení dílčích částí povodí je vždy nutné přistoupit individuálně a nelze uvažovat návaznost jednotlivých subpovodí na sebe. Při výpočtech není možné nějakým způsobem editovat přítok do povodí či plošné rozdělení jednotlivých povodí do dílčích polygonů. Algoritmus modelu pracuje pouze s veličinami celého samostatného povodí bez přítoků a s teoretickou srážkou. Vztah příčinného deště a následné odtokové reakce je hledán na základě zpracování dešťového souboru dat a průtokového souboru dat (N-leté vody) při určitých vlastnostech povodí, které jsou zredukovány do uvažovaných vstupů do modelu.

Cílem prací bylo vytvoření objektivního nástroje pro hledání malých povodí nejvíce ohrožených povodněmi z přívalových dešťů. Předpokládané využití tohoto nástroje je zejména na místech, kde se rozhoduje o toku financí v souvislosti

s ochranou před povodněmi z přívalových dešťů. Z toho důvodu bylo vytvořeno jednoduché grafické uživatelské rozhraní, které umožňuje plošně zatěžovat uzavřenou množinu povodí přívalovými dešti o zvolených parametrech. Výsledky jednotlivých výpočtů jsou zobrazovány na mapě, kde jsou po zadání zvolených dešťových parametrů zvýrazňována potenciálně ohrožená povodí. Vytvořená aplikace představuje první kompletní verzi produktu tohoto typu. Jeho možnosti použití jsou omezené a náměty pro další pokračování ve výzkumu jsou vyjmenovány v následující kapitole. Snahou bylo přistoupit k problematice hledání malých povodí ohrožených povodněmi z přívalových dešťů odlišným způsobem od operativního řešení. Jedná se o otevřený problém, který není vyřešen, ale bylo zde nastíněno, jakým způsobem se lze ubírat v budoucnu. Sestavením modelu, ověřením jeho funkčnosti a následným sestrojením první verze koncové mapové aplikace byl cíl disertace naplněn. Pomocí zvolených metod, teoretických nástrojů a sestavených algoritmů byly nalezeny vstupně-výstupní vztahy, které tvoří jádro vytvořeného modelu. Ten umožňuje posoudit profily nejen z hlediska maximálního průtoku Q_{max} a jeho N-letosti, ale také umožňuje vytypovat povodí z hlediska překročených mezních průtoků.

Určitá varianta výstupu byla použita jako vstup do operativního fuzzy modelu, který je nyní v poloprovozu testován na brněnské pobočce ČHMÚ. Fuzzy model zpracovává data z radarů a předpovědi na nejbližší časové období. Dalšími vstupy jsou veličiny *API*, která reprezentuje předchozí nasycení půdy u jednotlivých povodí, a *PRE*, jejíž hodnota je určena modelem vyvinutým v rámci předložené disertační práce. Operativní model byl uveden do zkušebního poloprovozu v průběhu léta 2014.

10 NÁMĚTY PRO DALŠÍ POKRAČOVÁNÍ VE VÝZKUMU

Představený model vycházející z fuzzy logiky a teorie možnosti představuje první ucelenou verzi nástroje pro hledání malých povodí ohrožených povodněmi z přívalových dešťů výše popsaným způsobem. Jádro aplikace bylo vytvářeno v programovém prostředí MATLAB, který je hojně využíván v soukromém i akademickém sektoru, nicméně je primárně určen pro vědeckotechnické pracovníky. Jeho nevýhodou je zejména nízká rychlost. Proto by bylo vhodnější pro práci na dalších verzích koncové aplikace využít jiné programovací nástroje, zejména pak pro konstrukci finálního grafického uživatelského prostředí. Koncová aplikace, by však měla v budoucnu být vytvořena v jiném prostředí.

Slabinou současné verze je to, že finální aplikace umožňuje testování pouze uzavřené množiny povodí. Nyní lze ve čtyřech výpočetních variantách různými způsoby plošně zatěžovat pevně definovanou množinu 184 povodí. Pro lepší využití modelu v praxi je však nutné umožnit uživateli přidávat libovolné množství povodí a testovat je stejným způsobem jako ostatní povodí. V takovém případě by bylo potřeba vytvořit datové matice pro nová povodí pomocí modelu, který by byl kalibrován na dříve sestavené matici vzorových dat. Zásadní by bylo vytvoření jednoduchého uživatelského prostředí pro vkládání vstupních parametrů

jednotlivých povodí a zahrnutí nových povodí do mapového podkladu. Současná verze pracuje s *.*shp* souborem dříve vytvořeným v prostředí GIS.

Další vývoj může pokračovat v oblasti rozšíření současné matice vzorových dat či aktualizace některých ze vstupních dat. Rozšíření matice vzorových dat může otevřít cestu pro vytváření samostatných modelů pro určité typy povodí, čímž by došlo k tzv. *clusterování*. Vytvoření samostatných modelů např. pro horská povodí s velmi výraznou sklonitostí či rozdělení testovací množiny na skupiny dle hydrogeologických rajónů by mohlo přinést zajímavé výsledky. Částečně odlišné výsledky by mohly být dosaženy při jiných způsobech určování hodnot použitých vstupních veličin. Primárním kritériem pro stanovení hodnot jednotlivých veličin byla jednoduchost. Čím jednodušší postup je, tím méně vznikne prostoru pro případné chyby při stanovování hodnot vstupních veličin. Předpokládá se, že v celém procesu je tolik nejistot, že zvýšení přesnosti v oblasti vstupů by již nepřineslo odpovídající nárůst na výstupu. Dalo by se uvažovat o mnoha odlišných způsobech stanovování hodnot vstupních veličin. Předpokládá se, že model by reagoval podobně, jen v částečně posunutých hodnotách, protože konzistentnost modelu byla ověřena výše popsanými metodami. Obecně však platí zásada, že postup stanovení hodnot vstupů musí být stejný při sestavování matice vzorových dat pro kalibraci modelu i při přidávání dalších povodí pro následné plošné testování v koncové mapové aplikaci.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

BERKA, P. (2003): *Současné trendy umělé inteligence*. Acta Oeconomica Pragensia, Praha, VŠE, 11, 8, od s. 41-46, 5 s. ISSN 0572-3043.

BRÁZDIL, R., KIRCHNER, K., et al (2007): *Vybrané přírodní extrémy a jejich dopady na Moravě a ve Slezsku*. 1. vydání. Brno, Masarykova univerzita v Brně. 432 s. ISBN 978-80-210-4173-8.

ČHMÚ (2009): *Vyhodnocení povodní v červnu a červenci 2009 na území České republiky [online]*. [cit. 2014-02-20]. Dostupné z: http://voda.chmi.cz/pov09/doc/05.pdf.

ČHMÚ (2010): *Hydrologická ročenka České republiky 2009*. Nakladatelství Český hydrometeorologický ústav, Praha, 172 stran.

ČHMÚ (2014): *Vysvětlení některých meteorologických pojmů a jevů [online]*. [cit. 2014-01-22]. Dostupné z WWW: <http://old.chmi.cz/meteo/olm/Let_met/Pojmy.htm>.

ČHMÚ (2015): *Indikátor přívalových povodní (Flash Flood Guidance)*. Český hydrometeorologický ústav [online]. 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://hydro.chmi.cz/hpps/main_rain.php?mt=ffg.

DHI (2014): *The expert in WATER ENVIRONMENTS*. DHI [online]. 2014 [cit. 2014-07-09]. Dostupné z: http://www.dhi.cz/.

DRBAL, K. (1999): *Operativní řízení povodňových průtoků fuzzy regulací v dolní části vodohospodářské soustavy.* Disertační práce, VUT-FAST, Brno, 96 s. 60 s. příloh.

DUB, O. (1963): *Hydrológia, hydrografia, hydrometria,* Slovenské vydavatelstvo technickém literatúry, n.p., Bratislava.

DUBOIS, D., PRADE, H. (1980): *Fuzzy Sets and Systems. Theory and Applications.* Academic press, New York, 393 s.

DUBOIS, D., PRADE, H. (1988): *Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*. New York: Plenum Press. ISBN 978-0306425202. 263 s.

DUBOIS, D. (2006): Possibility Theory and Statistical Reasoning. *Computational Statistics & Data Analysis*. roč. 51, č. 1, s. 47-69. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167947306001149.

FELDMAN, A. D. (2000): *Hydrologic Modeling Systém HEC-HMS, Technical Reference Manual*. USACE, Davis, 155 s.

FOUCHIER, C., AMAUD, P., LAVABRE, J., MIZZI, J. P. (2007): *AIGA: an operational tool for flood warning in southern France*. Principle and performances on Mediterranean flash floods, Assemblée générale de l'EGU.

HRÁDEK, F., ZEZULÁK, J. (1998): *Výpočet maximálních průtoků na malých povodích: model DesQ ver. 4. 1*. Praha, 1998, 48 s.

JANÁL, P. (2011): *Operativní předpovědi odtoku vody z povodí za povodní způsobených přívalovými srážkami pomocí fuzzy modelu: disertační práce*. Brno, 2011. 94 s., Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Miloš Starý, CSc.

JANÁL, P., STARÝ, M. (2009): Fuzzy model pro předpověď stupně ohrožení povodí povodněmi z přívalových dešťů (Fuzzy Model for Prediction of Run-Off from River Basin in the Case of Flash Flood). *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, vol. 57, No. 3, pp. 145-153, Polygrafia SAV, Bratislava, ISSN 0042-790X, IF 1.0.

JANÁL, P.; STARÝ, M. (2012): Fuzzy Model Used for the Prediction of a State of Emergency for a River Basin in the Case of a Flash Flood - PART 2. *Journal of Hydrology and Hydromechanic*, 2012, roč. 60, č. 3, s. 162-173. ISSN: 0042- 790X.

JANG, J. R. (1992): *Neuro-Fuzzy Modeling: Architectures, Analyses, and Applications*, Ph.D. Dissertation, EECS Department, Univ. of California at Berkeley.

JANG, J. R.(1993): ANFIS*:* Adaptive-Network-Based Fuzzy Interference System*.* IEEE Transactions on Systems. In: *Man and Cybernetics*, Vol. 23, No. 3., s. 665-685.

JURA, P. (1998): Základy fuzzy logiky pro řízení a modelování. In: IEEE Transactions on Systems, *Man and Cybernetics*, Vol. 23, No. 3, FEI VUT, Brno, 92 s.

KLIR, G. J., YUAN, B. (1995): *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic – Theory and Applications*. Prentice Hall PTR, New Jersey, 574 s., ISBN 0-13-101171-5.

MATĚJÍČEK, J., HLADNÝ, J. (1999): *Povodňová katastrofa 20. století na území České republiky*. Ministerstvo životního prostředí, Praha, 60 s. ISBN 8072121308.

Ministerstvo životního prostředí České republiky (2009): Zpráva o vyhodnocení povodně v červnu a červenci 2009 na území ČR. Praha : Ministerstvo životního prostředí. 20 s. Dostupné z WWW: <http://voda.chmi.cz/pov09/doc/01.pdf>.

NACHÁZEL, K., FOŠUMPAUR, P. (2010): Teorie možnosti v hydrologii a vodním hospodářství. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, roč. 58, č. 2, s. 73-97. ISSN 0042-790X. DOI: 10.2478/v10098-010-0008-y.

NACHÁZEL, K., PATERA, A., HEJZLAR, J. (1999): Fuzzy model řízení jakosti vody v nádrži, I. a II. část, In: *Vodohosp. Čas*., 47, č. 3, 6, s. 153-179, s. 384-404.

NACHÁZEL, K., STARÝ, M., ZEZULÁK, J. (2004): *Využití metod umělé inteligence ve vodním hospodářství*, Academia, nakladatelství Akademie věd České republiky, Praha, ISBN 80-200-02229-4.

NORBIATO, D., BORGA, M., DEGLI ESPOSTI, S., GAUME, E., ANQUETIN, S. (2008): Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: an assessment for gauged and ungauged basins, *Journal of Hydrology,* 362 (3–4), s. 274–290.

NOVÁK, V. (1990): *Fuzzy množiny a jejich aplikace*. SNTL, Praha, 148 s.

NTELEKOS, A. A.. GEORGAKAKOS, K. P., KRAJEWSKI, W. F. (2006): On the uncertainties of flash flood guidance: toward probabilistic forecasting of flash floods. *J. Hydrometeor*, 7, s. 896-915. DOI: http://dx.doi.org/10.1175/JHM529.1.

POKORNÝ, M. (1996): *Umělá inteligence v modelování a řízení.* BEN, Praha, 188 s.

SCHARFFENBERG, W. A., FLEMING, M. J. (2009): *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User´s Manual*. USACE, Davis, 289 s.

STARÝ, M. (2005): *Hydrologie: Modul 2*. Brno: VUT v Brně, 2005, 156 s.

STARÝ, M. (2001): *Use of Fuzzy Regulator during Operative Control of Single Reservoir during the Flood Passage*, IXth International Poster Day, Transport of Water, Chemicals and Energy in the System Soil-Crop Canopy-Atmosphere, 7 s., Bratislava, ISBN 80-968480-4-6.

SUGENO, M. (1977): Fuzzy Measures and Fuzzy Integrals. In: Gupta M.M., Saridis G.N., Ganies B.R.: *Fuzzy Automata and Decision Processes*, New York, North-Holand, s. 89-102.

TAGAKI, H., SUGENO, M. (1985): Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control. In: IEEE Trans. On Systems, *Man and Cybern.*, SMC-15(1), s. 116-132.

TARAMASSO, A. C., GABELLANI, S., and PARODI, A.: *An operational flash-flood forecasting chain applied to the test cases of the EU project HYDROPTIMET*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 5, 703-710, DOI:10.5194/nhess-5-703-2005, 2005.

TRUPL, J. (1958): *Intensity krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy*. Výzkumný ustav vodohospodářský, Praha.

VAŠKŮ, Z. (2009): Bleskové povodně : Hrozba krátkodobých srážek velké intenzity. *Vesmír*. 2009, 10, s. 618-622. Dostupný také z WWW: <http://www.vesmir.cz/clanek/bleskove-povodne>.

VÚV TGM. (2009): *Metodika mapování povodňového rizika: Dílčí zpráva*. Praha, 85+7 s. Dostupné z: http://voda.chmi.cz/pov09/doc/12.pdf

VYSOKÝ, P. (1996): *Fuzzy řízení*, Vydavatelství ČVUT, 131 s.

ZADEH, L. A. (1965): Fuzzy Sets. In: *Information and Control*, 8, s. 338-353.

ZADEH, L. A. (1978): Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*. roč. 1, č. 1, s. 3-28. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/ article/pii/0165011478900295.

Další zdroje jsou uvedeny v samotném textu disertace.

ŽIVOTOPIS AUTORA

Ing. Pavel Ježík

Narozen: 1986 ve Valašském Meziříčí

Trvalé bydliště: Bystřička 10, 756 24

Kontakt: jezik.p@fce.vutbr.cz

Vzdělání:

1997–2005	Masarykovo gymnázium Vsetín
2005–2009	Bakalářské studium (Bc.), VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny, obor Vodní hospodářství a vodní stavby; bakalářská práce na téma Srovnání přesnosti výpočetních vzorců kulminačních průtoků v závislosti na ploše malého povodí
2009–2010	Magisterské studium (Ing.), VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny, obor Vodní hospodářství a vodní stavby; diplomová práce na téma Předpovědi průměrných měsíčních průtoků pomocí generátoru umělých průtokových řad
2010–současnost	Doktorské studium, VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny, obor Vodní hospodářství a vodní stavby.

Řešené projekty:

2011	Rozšíření modelů podobnosti o zahrnutí externích proměnných – spoluřešitel, FAST-J-11-41
2012	Model vycházející z teorie možnosti pro určení míry odtoku z malého povodí po dopadu přívalové srážky – řešitel, FAST-J-12-20
2013	Odtoková reakce malého povodí na přívalovou srážku – řešitel, FAST-J-13-2048
2014	Softwarová aplikace pro určení ohroženého povodí přívalovým deštěm – řešitel, FAST-J-14-2400

Zaměstnání:

2012/11/01–2015/01/31	Hydrolog – věda a výzkum, ČHMÚ – pobočka Brno, úvazek 0,50
2015/02/01–současnost	Hydrolog – posudkář, ČHMÚ – pobočka Brno, celý úvazek