

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A

ENVIROMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ

**VLIV DESKRIPTORŮ POVODÍ NA SIMULAČNÍ
ÚČINNOST MODELU NA NEPOZOROVANÝCH
POVODÍCH**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Martin Heřmanovský, Ph.D.

Diplomant: Adéla Uhrová

2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vliv deskriptorů povodí na simulační účinnost modelu na nepozorovaných povodích vypracovala samostatně pod vedením Ing. Martina Heřmanovského, Ph.D. a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V..... dne.....

Adéla Uhrová

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Heřmanovskému, Ph.D. za pomoc a trpělivost při odborném vedení této diplomové práce.

Poděkování patří také rodičům za podporu během celého studia.

Abstrakt

Cílem této práce byla analýza vlivu výběru deskriptorů povodí na regionalizační proces využívající fyzikální podobnosti povodí. To zahrnovalo výběr souboru povodí a sestavení souboru jejich deskriptorů, výběr modelu a hodnotících kritérií simulační účinnosti kalibrace a validace modelu, provedení regionalizační studie využívající přístup fyzikální podobnosti povodí a posouzení vlivu použitých hodnotících kritérií na výběr optimálních deskriptorů povodí. Pro naplnění cíle práce byl použit datový soubor MOPEX (Model Parameter Estimation Experiment) pro 176 nepozorovaných povodí u USA. Byl vybrán konceptuální model GR4J (Mode'le du Ge'nie Rural a' 4 parametres Journalier) s optimalizačním algoritmem fitByDE založeným na diferenciální evoluci a byla stanovena tři následující hodnotící kritéria: koeficient účinnosti Nash Sutcliffe a dvě jeho modifikace, jedna využívá druhých odmocnin měřených a simulovaných odtoků pro výpočet kritéria (NSsq) a druhá logaritmů měřených a simulovaných odtoků pro výpočet kritéria (NSlog). Hydrologická regionalizace byla provedena pomocí přístupu založeného na fyzikální podobnosti povodí. K vyhledávání deskriptorově nejpodobnějších povodí byla použita metoda RAS (Rank-accumulated similarity method). Z vybraného souboru deskriptorů poskytovaly nejlepší výsledky průměrná nadmořská výška a souřadnice těžiště povodí. Hodnotící kritérium nemá na výběr deskriptorů velký vliv, protože výsledky byly velmi podobné pro všechna použitá hodnotící kritéria.

Klíčová slova

Nepozorované povodí, deskriptor povodí, konceptuální model

Abstract

The main goal of this thesis was to analyze of the catchment descriptors selection on the regionalization process using catchment physical similarity. That required a selection of catchments and creating a collection of their deskriptors, a choice of a model and evaluating simulation standards of the calibration efficiency and the model validation, execution of a regionalization study using an approach that was based on the catchment physical similarity and assessing influence of the validation standards which were used to choose optimal descriptors of catschments. To meet the goal of this thesis was picked a data file MOPEX (Model Parameter Estimation Experiment) for 176 catchments in the U.S.A.. As a conceptual model was chosen GR4J (Mode'le du Ge'nie Rural a' 4 parametres Journalier) with optimisation algorithm fitByDE based on differential evolution and following criteria were made: Nash-Sutcliffe efficiency coefficient and its two modifications, one using square roots measured and simulated discharges for calculation the NSsqr and the second one is using logarithms of measured and simulated discharges for calculation the Nslog. Hydrological regionalization was executed using an approach based on physical similarities of catchments. To find the most similar catchment the RAS (Rank-accumulated similarity method) method was used. From the selection of descriptors provide the best results average altitude and coordinates of the centre of gravity of the catchment. The evaluation criteria has a great influence on the choice of descriptors, because the results were very similar for all the evaluation criteria.

Key words

Ungauged catchment, catchment descriptor, conceptual model

OBSAH

OBSAH	6
1 ÚVOD	7
2 CÍLE PRÁCE	8
3 LITERÁRNÍ REŠERŠE	9
3.1 Modelování srážko-odtokového procesu	9
3.1.1 Definice srážko-odtokového modelu	9
3.1.2 Rozdělení modelů	9
3.1.3 Konceptuální model	13
3.1.4 Kalibrace	14
3.1.4.1 Objektivní kritéria	15
3.1.5 Verifikace	17
3.2 Hydrologická Regionalizace	18
3.2.1 Regionalizace na základě regrese	18
3.2.2 Regionalizace založená na přístupu geografické blízkosti	20
3.2.3 Regionalizace založena na fyzikální podobnosti	20
4 METODIKA	23
4.1 Vstupní data: popis souboru povodí a jejich charakteristik	23
4.2 Popis použitého modelu, optimalizačního algoritmu a hodnotících kritérií	25
4.2.1 Model GR4J	25
4.2.2 Optimalizační algoritmus diferenciální evoluce	27
4.2.3 Hodnotící kritéria	28
4.3 Popis regionalizační metody	29
5 VÝSLEDKY	30
5.1 Kalibrace a validace modelu GR4J	30
5.2 Analýza vztahu mezi simulační účinností modelu a charakteristikami povodí	31
5.3 Regionalizační studie na souboru MOPEX povodí	33
6 DISKUSE	40
7 ZÁVĚR	44
8 PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
9 PŘÍLOHY	53

1 ÚVOD

Hydrologická povodí lze mimo jiné rozdělit z hlediska množství hydrologických dat o nich dostupných na povodí pozorovaná a nepozorovaná. Pozorovaná povodí jsou taková povodí, pro která máme dostatek hydrologických dat z provedených měření a výpočtů.

Nepozorovaná povodí jsou označována jako taková povodí, o kterých máme nedostatečný objem dat z hydrologických pozorování. Není u nich tedy možný adekvátní výpočet potřebných hydrologických veličin (kvantita či kvalita vody) v příslušných prostorových a časových měřítcích, a přesnosti přijatelné pro praktické aplikace (Sivapalan et al., 2003). Nedostatečný monitoring hydrologických charakteristik zatěžuje zejména malá povodí. Ta jsou ovšem pro hydrologii velmi podstatná, protože velmi rozmanitě ovlivňují vodní režim.

Ke snížení tohoto problému velmi pomohl experiment MOPEX (Model Parameter Estimation Experiment). Jedná se o mezinárodní projekt zaměřený na rozvoj a rozšíření techniky pro apriori odhad parametrů hydrologických modelů, ale i pedologických a atmosférických modelů. Vědecká strategie MOPEX zahrnuje tři hlavní kroky: přípravu dat, rozvoj metody odhadu předběžného parametru a demonstraci parametru převoditelnosti. Komplexní databáze MOPEX byla vyvinuta, aby sjednotila historické hydrometeorologické údaje a údaje povrchových vlastností půdy pro mnoho hydrologických povodích v Spojených státech amerických a v jiných zemích. Tato databáze je průběžně rozšiřována o další povodí ze všech koutů světa (Duan et al., 2006).

Pro nepozorovaná povodí bez dostatečných odtokových údajů, musí být parametry převzaty z jiných povodí, které tyto odtokové údaje mají. Tento proces je označován jako hydrologická regionalizace (Blöschl, 2004). Hydrologická regionalizace se využívá pro predikci odtoku na nepozorovaných povodích (Zhang & Chiew, 2009).

2 CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce je posouzení vlivu deskriptorů povodí na simulační účinnost modelu na nepozorovaných povodích. Výběr vhodných deskriptorů povodí je často ovlivňován dalšími faktory. Mezi tyto patří např. výběr modelové struktury, výběr hodnotícího kritéria simulační účinnosti, zvolená regionalizační metoda a jiné. Tato práce se hlouběji zaměřuje na vyhodnocení vlivu použitých hodnotících kritérií na výběr optimálních deskriptorů povodí pro regionalizační přístup fyzikální podobnosti povodí.

Dílčí cíle jsou následující:

- 1) výběr modelové struktury a hodnotících kritérií simulační účinnosti,
- 2) výběr souboru povodí a sestavení souboru jejich charakteristik,
- 3) kalibrace a validace zvoleného modelu,
- 4) provedení regionalizační studie využívající přístup fyzikální podobnosti povodí a posouzení vlivu použitých hodnotících kritérií na výběr optimálních deskriptorů povodí.

Diplomová práce má následující strukturu: Nejprve je v literární rešerši obecně popsáno modelování srážko-odtokového procesu, rozdělení modelů podle různých kritérií, kalibrace modelu a základní metody regionalizace. V kapitole Metodika je specifikován soubor povodí, použitý model, zvolená kalibrační technika a použitá regionalizační metoda. V kapitole výsledky jsou prezentovány získané výstupy formou tabulek a grafů, některé z nich jsou pro svou velikost uvedeny v příloze. Výsledky jsou pak diskutovány v diskuzi a závěru.

3 LITERÁRNÍ REŠERŠE

3.1 MODELOVÁNÍ SRÁŽKO-ODTOKOVÉHO PROCESU

3.1.1 DEFINICE SRÁŽKO-ODTOKOVÉHO MODELU

Model je zjednodušená reprezentace části přírodního nebo člověkem formovaného světa, která může reprodukovat některé z jeho charakteristik. Avšak model není teorie a proto je nutné rozlišovat mezi modely, které jsou konstruovány pro predikci chování systému některé konkrétní přesnosti a modely, které jsou vyvinuty s cílem poskytnout vhled do povahy činnosti systému (Dooge, 1986).

Matematický model je soubor na sebe navazujících a navzájem propojených algebraických rovnic a logických pravidel, který převádí numericky vyjádřené vstupy do hledaných výstupů (Dingman, 2002). Cílem matematických modelů je kvantifikace příslušných přírodních procesů.

Matematický model srážko–odtokového procesu je zjednodušenou představou složitého hydrologického systému se vzájemnými vazbami mezi proměnnými veličinami. Hydrologický systém je definován jako systém fyzikálních procesů, které působí na vstupní proměnné za účelem jejich transformace ve výstupní proměnné. Hydrologický matematický model vlastně představuje algoritmus řešení soustavy rovnic, kterými je popsána struktura nebo chování povodí anebo obojí během srážko-odtokového procesu (Kulhavý, Kovář, 2000).

3.1.2 ROZDĚLENÍ MODELŮ

Hydrologické modely lze dělit podle různých hledisek a kritérií do několika skupin. Clarke (1973) a Dingman (2002) rozlišují shodně tři základní skupiny modelů:

- analogové modely
- fyzikální modely
- matematické modely

Analogové modely využívají podobnosti navzájem různých přírodních procesů. Přírodní procesy jdou pak vyjádřit jinými analogickými procesy (Clarke, 1973; Dingman, 2002). Fyzikální modely reprezentují části přírodního prostředí (Chow et al., 1988). Pokud je model sestaven ve větším nebo menším měřítku, než je přírodní systém, pak používáme formální pravidla založená na rozměrové analýze k vyjádření vztahu modelu k reálnému systému (Clarke, 1973; Dingman, 2002).

Matematické modely převádí vstupní hodnoty na výstupní hodnoty za pomoci soustav rovnic, numerických a logických operátorů. Důležité součásti matematického modelu jsou rovnice, jejichž formy reprezentují kvalitativní chování modelu, dále parametry, tedy číselné konstanty těchto rovnic, které řídí kvantitativní chování modelu (Clarke, 1973; Dingman, 2002).

Jedním ze základních rozdělení je také dělení dle Zemana (1994) podle kauzality a to na modely:

- stochastické
- deterministické

Stochastický je takový model, ve kterém jedna z proměnných vystupujících v modelu je nahodilá, tj. má nějaké pravděpodobnostní rozdělení (Kovář, 1990). Parametry jsou náhodně generovány a dva shodné soubory vstupních dat mohou dát rozdílné výsledky. Stochastické modely dále dělíme na pravděpodobnostní modely a na modely pro generování časových řad (Zeman, 1994). Používají se při extrapolaci časových řad nebo hydrologických parametrů při zachování základních statistických charakteristik. Klasickým příkladem je model ARIMA (Daňhelka, 2003).

Deterministický model je takový model, kde je každá proměnná reprezentována jednou hodnotou a jejich vztahy mezi sebou i k parametrům jsou pouze příčinné tedy deterministické. Účelem těchto modelů v hydrologické aplikaci je popsat co nejpřesněji matematickými rovnicemi vztahy určité fyzikální představy, které jsou předmětem zájmu. Čím je popis fyzikálních vztahů lepší, tím je model přesnější. S ohledem na omezenou kvalitu i kvantitu pozorovaných proměnných a tím i odvozených parametrů se vyvinuli dvě hlavní větve deterministických modelů (Kovář, 1990):

- fyzikálně založené - hydrodynamické - "white box"
- hydrologické – parametrické

Pro hydrologické modely jsou typické dva přístupy:

- empirický - kybernetický - “black box“
- konceptuální - “grey box“

Empirické modely používají dostupné vstupní a výstupní datové řady, bez ohledu na fyzikální zákony, které jsou zahrnuty v hydrologickém systému, k odvození jak struktury modelu, tak i jemu odpovídajících parametrů. Tyto modely jsou založené na informaci získané při analýze vstupních a výstupních časových řad, tedy hledají matematický vztah mezi vstupními a výstupními datovými řadami (Diermanse, 2001; Wagener et al., 2004). Příkladem empirických modelů jsou např. modely založené na umělých neuronových sítích (ANN), případně autoregresní modely.

Konceptuální modely patří mezi simulační modely, jenž jsou volně založené na fyzikálních zákonech a tedy rovnice použité v těchto modelech jsou pouze přibližnou reprezentací reálného světa (Beven, 1989; Dingman, 2002). Nejčastěji využívají zásobníky jako hlavní stavební komponenty. Struktura konceptuálních modelů je na rozdíl od empirických modelů specifikována před jejich použitím na základě pochopení hydrologického systému, ale parametry modelu musí být také odvozeny v kalibrační fázi pomocí vstupních a výstupních časových řad (Wagener et al., 2004).

Fyzikálně založené modely jsou simulační modely založené na exaktním popisu fyzikálních zákonů, jako jsou zákon zachování hmoty, zákon zachování energie a další (Clarke, 1973; Dingman, 2002). Předpokládá se, že úroveň fyzikální reprezentace, na které jsou tyto modely založeny, může být dostatečná pro spojení jejich parametrů s měřitelnými deskriptory povodí. Tím pádem by nemusely být kalibrovány, ale protože fyzikálně založené modely vyžadují velké množství vstupních dat a parametry těchto modelů nemohou být odvozeny přímo, vyžadují modely určitý stupeň kalibrace několika klíčových parametrů proti zaznamenaným časovým řadám (Beven, 1989; Diermanse, 2001; Wagener et al., 2004). Příkladem fyzikálního modelu může být model SHE, jenž představuje zatím nejúplnější hydrodynamický přístup modelu (Kulhavý & Kovář, 2000).

Podle aplikace se modely rozdělují na (Daňelka, 2003):

- predikční - návrhové
- předpovědní

Predikční modely slouží pro základy civilního inženýrství, například pro stavbu vodních děl (Dingman 2002). Předpovědní modely slouží k předpovědi odtoku z povodí, například pro povodňovou srážku.

Z hlediska rozčlenění vstupních a stavových veličin se modely dělí na (Daňelka, 2003):

- celistvé
- distribuované
- semi-distribuované
- modely 1D, 2D, 3D

U celistvých jsou parametry v celém výpočetním procesu neměnné. Oproti tomu parametry distribuovaných modelů se mění v čase i v prostoru. U semi-distribuovaných se mění pouze některé parametry. Tvoří přechod mezi první a druhou skupinou modelů. Modely 1D interpolují hladinu mezi příčnými profily. Vyžívají se k modelování říčních systému a předpovídání povodní. 2D modely poskytují informace o vodním a rychlostním stavu. Používají se např. pro výpočty týkajících se plavebních kanálů. 3D modely se používají ve srovnání s modely 1D a 2D méně, i když jsou schopny podat informaci o tom, zda je v toku větší rychlost u dna či u hladiny.

Dle způsobu výpočtu Dingman (2002) dělí modely na:

- 0-dimenzionální
- Analytické
- Numerické
- Hybridní

Výpočty 0-dimenzionálních modelů nejsou založeny na formálním souřadnicovém systému. Obvykle se používají u celistvých modelů. Analytické řešení počítá v souřadnicovém systému s diferenciálními rovnicemi, které se dají vyřešit analyticky. Při numerickém řešení jsou diferenciální rovnice řešeny metodou konečných diferencí, konečných prvků, konečných objemů a řadou dalších. Za hybridní řešení se považuje spojení 0-dimenzionálního řešení a formálního řešení pro model (Dingmann, 2002).

Podle Kováře (1990) je možné dělit modely podle toho, zda se snaží popsat celý hydrologický cyklus nebo jen některou z jeho částí se modely dělí a to na:

- komplexní
- komponentní

Další rozdělení modelů dle Kováře (1990) je podle časových a prostorových údajů na modely:

- kontinuální
- diskrétní (epizodní)

Kontinuální modely využívají dlouhé časové řady srážek a dalších potřebných hydrometeorologických dat. Diskrétní neboli epizodní modely využívají krátkou časovou řadu a nevstupují do nich normální, respektive nepřívalové srážky (Kovář, 1990).

3.1.3 KONCEPTUÁLNÍ MODEL

Konceptuální neboli koncepční model bývá též často nazýván jako model typu „grey box“. Pro tento typ modelu je typická formulace jednotlivých částí hydrologického cyklu nebo celého cyklu pomocí matematických vztahů. Principem konceptuálního modelu je, že fyzikální podstata procesů je velmi zjednodušena. Model je sestaven na základě formulace konceptu, který je vztažen k modelovanému systému (Daňhelka, 2003). Konceptuální modely jsou založené na dvou kritériích. Za prvé, struktura modelu je specifikována před samotným modelováním, a za druhé, ne všechny parametry v modelu mají přesný fyzikální význam, tedy nejsou samostatně měřitelné (Wheater et al., 1993). Pro většinu koncepčních modelů je nutno v identifikační fázi jejich použití počítat s upřesňováním jejich parametrů některou optimalizačních technik.

Konceptuální hydrologické modely se snaží schematizovat odezvu povodí na vstupní srážku nejčastěji pomocí soustavy navzájem propojených nádrží. Vzájemné propojení nádrží je vyjádřeno toky, které jsou řízeny zpravidla kalibrovanými parametry modelu. Mělo by přitom platit, že struktura modelu odpovídá skutečným procesům na povodí. V současné době jsou dostupná obecná softwarová prostředí, která umožňují sestavit celou

řadu konceptuálních modelů, např. Rainfall Runoff Modelling Toolkit (Wagener et al., 2004). Příkladem často využívaných konceptuálních modelů mohou být modely BROOK90 (Kronenberg, 2013), TOPMODEL (Beven et al., 1995), GR4J (Oudin et al., 2008), nebo model SACRAMENTO (Burnash et al., 1973) který je flexibilním koncepčním modelem, sloužícím jak pro účely simulace srážko-odtokových epizod, tak i kontinuální hydrologické bilance. Model je poměrně složitý, má 15 parametrů, z nichž některé jsou optimalizovány. Model bývá využíván s uplatněním scénářů klimatických změn, používá se i v ČR (Kulhavý & Kovář, 2000). Konceptuální modely jsou v hydrologii široce používány, protože požadované vstupní údaje jsou obvykle snadno dostupné a modely jsou jednoduché a snadno použitelné (Merz & Blöschl, 2004).

3.1.4 KALIBRACE

Kalibrací modelu se rozumí proces, při kterém dochází k přizpůsobení hodnot parametrů použitých při simulaci odtoku s cílem zjistit skutečné chování povodí a připravit tím srážko-odtokový model, například pro operativní běh. Jde o iterační postup hledání nejlepší shody mezi povodím a chováním modelu (Ibbitt, 1972; Sorooshian & Gupta, 1995; Wagener et al., 2004). Tato shoda se obvykle posuzuje jednou nebo více objektivními funkcemi, které jsou doplněné o vizuální kontrolu zaznamenaných a vypočtených hydrogramů odtoku (Wagener & Wheater, 2006). Úpravou hodnot parametrů můžeme rozumět např. testování různých sad parametrů náhodně nebo určitým postupem vybraných v parametrickém prostoru nebo v jeho určité části.

Kalibraci lze rozdělit na manuální a automatickou. Manuální kalibrace, i přes svou časovou náročnost je velmi rozšířeným přístupem a to i pro dosti komplexní modely. Velké nevýhody manuální kalibrace jsou přílišná subjektivita a dále nutnost správného pochopení použitého hydrologického modelu a chování povodí. Tato znalost je pak velmi obtížně přenositelná z osoby na osobu, nebo z modelu na model (Boyle et al., 2000).

Automatická kalibrace je v porovnání s manuální kalibrací rychlá objektivní strategie, která eliminuje subjektivitu posuzování obsaženou v manuální kalibraci. Provádí rozsáhlé vyhledávání existujících kombinací hodnot parametrů v parametrickém

prostoru, je tedy vysoce pravděpodobné, že výsledek bude lepší než ten, který by byl získán pomocí manuální kalibrace (Boyle et al., 2000; Sorooshian & Gupta, 1995).

Automatická kalibrace se běžně skládá ze čtyř prvků, z optimalizačního algoritmu, objektivní funkce, ukončovacího kritéria a kalibračních dat, často je ještě doplněná o verifikační postup (Sorooshian & Gupta, 1995).

Obecně je proces kalibrace konceptuálních modelů obtížný, kvůli velkému počtu faktorů, které jej komplikují. Mezi tyto faktory patří zejména častá nelinearita vlivu parametrů na výsledný odtok, velký počet neznámých parametrů, které je třeba určit, nejednoznačnost řešení, neboť změnu jednoho parametru lze vykompenzovat změnou jiného.

Dále mezi zatěžující faktory můžeme zařadit chyby v zaznamenaných datech použitých při kalibraci, neinformovatelnost těchto dat, časovou náročnost a jiné. Správný výběr kalibračních dat může podstatně redukovat obtíže spojené s kalibrací modelu. Nicméně, v současné době víme málo o tom, co vlastně vytváří kvalitní kalibrační data. Zásadním problémem je, jak velká délka datových souborů je nezbytná pro kalibraci modelu a jak velká variabilita použitých dat bude poskytovat nejlepší výsledky v rámci jedné nebo více vybraných objektivních funkcí (Sorooshian & Gupta, 1995).

3.1.4.1 Objektivní kritéria

Objektivní funkcí rozumíme funkci udávající velikost rozdílu mezi simulovaným výstupem modelu a zaznamenanou odezvou povodí (Beven, 2000; Diskin & Simon, 1977; Duan et al., 1992). Cílem kalibrace je hledání globálního nebo lokálního extrému vybrané objektivní funkce. Jedná se vlastně o číselné vyjádření chyby. Automatická optimalizace parametrů spočívá především v jejich funkční specifikaci. Všechny parametry musí být popsány funkčními vztahy společně s proměnnými. Soustava těchto vztahů je potom kalibrována podle vybraného objektivního kritéria (Kovář, 1990).

Kalibrace modelu probíhá do doby, kdy dojde k dobré shodě mezi zaznamenaným a simulovaným výstupem, neboli do doby, kdy dojde k minimalizaci nebo maximalizaci objektivní funkce. Po objektivní funkci se vyžaduje, aby byla v parametrickém prostoru konvexní, neboť její konvexnost v parametrickém prostoru teoreticky zaručuje konvergenci použitého optimalizačního algoritmu (Gupta & Sorooshian, 1985; Moussa & Chahinian, 2009). Ke kalibraci používáme zpravidla jednu nebo více objektivních

funkcí, jejichž výběr je v podstatě subjektivní, což má samozřejmě vliv na optimální hodnoty parametrů modelu (Diskin & Simon, 1977; Moussa & Chahinian, 2009). Objektivní funkce se dělí na funkce statistické a hydrologické. Statistické objektivní funkce nejčastěji využívají sumu čtverců reziduí. Jako příklady lze uvést (YU et kol., 1994, Dawson 2007):

Střední absolutní chyba (Mean Absolute Error - MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_i - \widehat{Q}_i|,$$

kde n...počet měření

Q_i ...měřená hodnota průtoku

\widehat{Q}_i ...simulovaná hodnota průtoku

Relativní absolutní chyba (Relative Absolute Error - RAE)

$$RAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i - \widehat{Q}_i|}{\sum_{i=1}^n |Q_i - Q|},$$

kde n...počet měření

Q_i ...měřená hodnota průtoku

\widehat{Q}_i ...simulovaná hodnota průtoku

Q ...průměr měřených hodnot

Směrodatná odchylka (Mean Square Error – MSE)

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (Q_i - \widehat{Q}_i)^2}$$

kde n...počet měření

Q_i ...měřená hodnota průtoku

\widehat{Q}_i ...simulovaná hodnota průtoku

Korelační koeficient (Correlation Coefficient - CC)

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \widehat{Q}_i)^2 \sum_{i=1}^n (\widehat{Q}_i - \bar{Q}_i)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \sum_{i=1}^n (\widehat{Q}_i - \bar{Q}_i)^2}}$$

kde n...počet měření

Q_i ...měřená hodnota průtoku

\widehat{Q}_i ...simulovaná hodnota průtoku

\bar{Q}_i ...průměr měřených hodnot

Dalším příkladem může být Nash-Sutcliffeův koeficient účinnosti a jeho modifikace (Nash & Sutcliffe, 1970). Koeficient účinnosti Nash Sutcliffe (NSE) je široce používaná, normalizovaná a potenciálně spolehlivá statistika pro hodnocení přesnosti hydrologických modelů (McCuen, 2006). Nash Sutcliffe určuje relativní velikost reziduálního rozptylu ("šum") v porovnání s odchylkou naměřených dat ("informace") (Nash & Sutcliffe, 1970). NashSutcliffeův koeficient účinnosti je podrobněji popsán v metodice (kapitola Hodnotící kritéria).

K hydrologickým objektivním funkcím se řadí (YU et al., 1994, Dawson 2007):

Chyba odhadu kulminačního průtoku (Error of Peak Discharge - PQp)

$$PQp = \frac{Q - \widehat{Q}_p}{Q_p}$$

kde \widehat{Q}_p ...simulovaný kulminační průtok

Q_p ...měřený kulminační průtok

Chyba v době kulminačního průtoku (Error of Time Peak - ETp)

$$ETp = T_p - \widehat{T}_p$$

kde \widehat{T}_p ...čas simulovaného kulminačního průtoku

T_p ...čas měřeného kulminačního průtoku

3.1.5 VERIFIKACE

Verifikace, jinak také zvaná jako validace, je proces, který probíhá po kalibraci nebo přímo v operativním běhu. Jeho cílem je ověřit důkladnost modelu a jeho schopnost popsat hydrologickou reakci povodí. Ověření, že model se chová správně i na jiných datech než jsou data kalibrační. Dále také najít všechna zkreslení kalibrovaných parametru (Gupta et al., 2005).

3.2 HYDROLOGICKÁ REGIONALIZACE

Termínem hydrologická regionalizace je obecně označován proces přenosu hydrologické informace mezi povodími. Touto informací mohou být např. parametry srážko-odtokového modelu (Blöschl & Sivapalan, 1995).

Volba povodí, ze kterých má být informace převedena je obvykle založena na nějakém měřítku podobnosti. Tedy je tendence vybrat ta povodí, jenž jsou co možná nejvíce podobná zájmovému povodí. Jednou společnou podobností je prostorová blízkost, založená na předpokladu že povodí, která jsou blízko u sebe, budou mít podobný režim odtoku stejně tak, jako mají podobné klimatické podmínky. Není to ale úplně správná teze a bývá často kritizována. Možným opatřením vedoucím k určité alternativní podobnosti mezi povodími je použití deskriptorů povodí. Deskriptory povodí jsou atributy charakterizující například způsob využití půdy, půdní typy a topografické charakteristiky. V zásadě lze předpokládat, že parametry modelu úzce souvisejí s deskriptory povodí. Parametry modelu jsou určeny k reprezentaci funkčního chování povodí, které by mělo být řízeno pomocí těchto deskriptorů povodí např. využití půdy (Merz, 2004).

Existuje několik typů regionalizačních metod. Každá z nich má určité výhody a nevýhody (Oudin et al., 2008). V následujících kapitolách jsou popsány: regionalizace na základě regrese, regionalizace založená na přístupu geografické blízkosti a regionalizace založená na fyzikálním přístupu.

3.2.1 REGIONALIZACE NA ZÁKLADĚ REGRESE

Tento přístup patří mezi nejvíce používané regionalizační metodiky. Je založen na stanovení regionálních regresních rovnic pro odhad parametrů modelu proti vybraným deskriptorům povodí. Odvozené regionální regresní rovnice se používají k odhadu hodnot parametrů na nepozorovaném povodí. Pro získání těchto regresních rovnic je důležitý výběr vhodné skupiny dobře měřených povodí se známými nebo správně odhadnutými deskriptory, dále výběr modelové struktury, kterou považujeme za

vhodnou pro odpovídající soubor povodí a identifikace optimálního parametrického souboru pro každé pozorované povodí v rámci tohoto souboru (McIntyre et al., 2005; Oudin et al., 2008).

Nedostatkem tohoto přístupu je existence různých sad parametrů, které na daném povodí vedou ke stejným simulačním účinnostem modelu, a proto nemá získaná regresní rovnice dostatečnou váhu. Eliminací tohoto možného zkreslení se zabývali Hundecha a Bárdossy (2004). Zjistili, že pokud je funkční podobnost vztahu mezi charakteristikami povodí a parametry modelu pak existuje jakási vzorová kalibrace, která se dá použít pro mnoho povodí současně.

Jako příklady regionalizačních studií, kde byla použita regionalizace na základě regrese, lze uvést například práci, jejímž autorem byl Young (2006), ten odvodil regresní rovnice pro 6 parametrů modelu BIAS pro souboru 260 britských povodí. Tato práce říká, že přístup založený na regresi v porovnání s přístupy založenými na prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti dává nejlepší prediktivní výsledky.

Dalšími, kdo se zabývali regionalizací na základě regrese byli Yadav et al. (2007), provedli pilotní studii na 30 malých až středně velkých povodích Anglie a Walesu, které pokrývají širokou škálu půdních typů. Ve své studii použili místo přímého odhadu hodnoty pro parametry modelu, odhad na základě nejistoty. Zjistili, že hlavními určujícími charakteristikami jsou index vlhkosti, sklon povodí a hydrogeologické charakteristiky. Tento přístup poskytuje ostré a spolehlivé předpovědi.

Xu (1999) zkoumal vodní bilanci pomocí konceptuálního modelu pro simulaci odtoku na nepozorovaných povodích. Použil 6-parametrový model MWB, který byl aplikován na 26 povodí ve středním Švédsku, tato povodí jsou sezóně pokryta sněhem. Ke svému výzkumu použil regionalizaci na základě regrese. Výsledky ukazují, že model MWB lze uspokojivě použít pro regionalizaci na základě regrese na nepozorovaných povodích v oblasti Švédska a také pro další studie.

3.2.2 REGIONALIZACE ZALOŽENÁ NA PŘÍSTUPU GEOGRAFICKÉ BLÍZKOSTI

Přístup prostorové blízkosti či vzdálenosti spočívá v přenosu parametrů ze sousedního nebo geograficky velmi blízkého povodí na nepozorované povodí. Důvodem, proč používat tento přístup je, že v rámci vymezeného regionu budou klimatické a fyzikogeografické deskriptory relativně homogenní, a proto by se geograficky sousední nebo velmi blízká povodí měla chovat hydrologicky podobně (Oudin et al., 2008; Parajka et al., 2005). Nejjednodušší způsob provedení přístupu geografické blízkosti je přenesení celého parametrického souboru z pozorovaného sousedního nebo velmi blízkého povodí (donoru) na nepozorované povodí (akceptor). Takto provedený přenos parametrů však nezaručuje uspokojivou predikci odtoku na nepozorovaném povodí, protože tato povodí nemusí být hydrologicky podobná ve všech parametrech. Proto bylo navrženo mnoho zpřesnění této metody. Oudin et al., (2008) uvádí 3 možnosti. Například přiřazení váhy inverzní vzdálenosti na „dárcovské“ povodí. Toto vylepšení navržené Oudinem (2008) se ovšem může jevit jako nedostatečné, protože i blízká povodí mohou být velmi rozdílná s ohledem na jejich hydrologické vlastnosti (Post et al., 1998; Beven, 2000).

Například Merz & Blöschl (2004) a Parajka et al. (2005) provedli regionalizaci 11 parametrů modelu HBV na více než 300 rakouských povodích. Tento experiment ukázal, že regionalizace založená na prostorové blízkosti nabízí nejvyšší účinnost modelu na nepozorovaných povodích ve srovnání s ostatními metodami regionalizace. Tímto experimentem také ukázali, že použití vnořených povodí jako „dárcovských“ povodí může výrazně zlepšit základní přístup prostorové blízkosti (Oudin et al, 2008).

3.2.3 REGIONALIZACE ZALOŽENA NA FYZIKÁLNÍ PODOBNOSTI

Přístup fyzikální podobnosti spočívá v přenosu hydrologické informace z pozorovaného povodí na nepozorované povodí. Informace (parametry modelu) je zde pak přenášena mezi povodími, která jsou si v použitých deskriptorech co nejvíce podobná a nemusí se jednat o geograficky sousední povodí. Tato myšlenka pochází ze studií, které provedli

Acreman & Sinclair (1986) a Nathan & McMahon (1990). Hlavní myšlenkou této metody je, že povodí s velmi podobnými deskriptory se také budou hydrologicky chovat velmi podobně.

Pro identifikaci pouze jednoho nejpodobnějšího pozorovaného povodí se používá metoda "single donor" přístupu. Tato metoda předpokládá stejné hodnoty sledovaných parametrů modelu na identifikovaném deskriptorově nejpodobnějším pozorovaném povodí a nepozorovaném povodí. Při identifikaci více než jednoho deskriptorově nejpodobnějšího pozorovaného povodí jde o metodu „multiple donor“. U tohoto přístupu je ovšem nutné provést odhad hydrologické charakteristiky na nepozorovaném povodí na základě známých hydrologických charakteristik všech identifikovaných nejpodobnějších pozorovaných povodí.

V rámci regionalizace založené na fyzikální podobnosti povodí je k vyhledávání deskriptorově nejpodobnějších pozorovaných povodí používáno několik metod, například metoda RAS, metoda shlukové analýzy dat nebo metoda nejmenšího indexu podobnosti (Parajka et al., 2005; Oudin et al., 2008).

Jako příklad regionalizační studie, kde byla použita regionalizace na základě fyzikální podobnosti, může být studie, kterou zpracoval McIntyre et al. (2005). Provedl studii na 127 amerických povodích pro 5-parametrový model PDM. Získané výstupy dokázaly, že přístup fyzikální podobnosti je lepší než regresní přístup.

Studie uvedené dále se zabývaly porovnáním regionalizačních přístupů. Kay et al. (2006) porovnávali 3 (zde uvedené) přístupy regionalizace na 119 britských povodích. Použil dva 6-parametrové modely PDM a TATE. Zjistili, že pro model PDM je přístup fyzikální podobnosti o něco málo lepší než přístup na základě regrese, pro model TATE vychází jako nejlepší přístup regionalizace na základě regrese.

Příkladem další studie je práce Oudina et al. (2008), ve které srovnává regionalizační přístupy založené na prostorové blízkosti, fyzikální podobnosti a regresi. Práci provedli na 913 francouzských povodích, použili modely GR4J a TOPMODEL. Dospěli k závěru, že nejlepším přístupem je přístup prostorové blízkosti a nejhorším přístup na základě regrese. Přístup fyzikální podobnosti je vzhledem pro tato povodí průměrný. Určité zlepšení výsledků simulovaných odtoků na nepozorovaných povodích by pravděpodobně bylo možné zajistit novým přístupem, který by byl kombinací

regionalizace na základě prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti (Oudin et al., 2008; Zhang, 2009).

4 METODIKA

4.1 VSTUPNÍ DATA: POPIS SOUBORU POVODÍ A JEJICH CHARAKTERISTIK

K analýze byl použit soubor 176 povodí projektu MOPEX (Duan et al., 2006) situovaných v USA neovlivněných sněhovým režimem. Použité časové řady obsahovali denní záznamy srážek (mm), potenciální evaporace (mm) a odtoku (mm). Celková délka časových řad byla 20 let. Ke kalibraci modelu byly použity časové řady o délce 10 let (1. 1. 1970 až 31. 12. 1979). Stejně dlouhé řady byly použity pro validaci modelu (1. 1. 1980 až 31. 12. 1989). Rozmístění jednotlivých povodí na území USA znázorňuje orientační mapa na obrázku č. 1. Nejvíce povodí je situováno na jihovýchodě USA.



Obr. č. 1: Orientační mapka rozmístění 176 nepozorovaných povodí na území USA.

Pro regionalizační studii založenou na přístupu fyzikální podobnosti povodí byl sestaven soubor 13 charakteristik povodí pro každé ze 176 MOPEX povodí. V tabulce č. 1 jsou tyto charakteristiky uvedeny spolu s jejich označením a jednotkou. Hodnoty

průměrné roční srážky byly vypočteny pomocí modelu PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model) pro období 1961 – 1990 (Daly, 1994). Index aridity byl pro každé povodí vypočten jako podíl průměrné roční srážky a průměrné roční potenciální evaporace. Hodnoty průměrné roční potenciální evaporace byly odvozeny na základě NOAA Evaporation Atlas (Farnsworth, 1982).

Tabulka č. 1: Seznam použitých charakteristik povodí

Pořadí	Označení	Název	Jednotky
1	P	průměrná roční srážka	Mm
2	P/PE	index aridity	-
3	CS	relativní zastoupení těžkých půd na povodí	-
4	SHC	nasyčená hydraulická vodivost	m/s
5	Fo	relativní zastoupení lesních porostů na povodí relativní zastoupení urbanizovaných ploch	-
6	Ur	na povodí	-
7	Gf	pokryvnost povodí v únoru	-
8	mean.elev.	průměrná nadmořská výška	m n. m.
9	elev.iqr.	interkvartilové rozpětí nadmořských výšek	-
10	X	x souřadnice těžiště povodí	-
11	Y	y souřadnice těžiště povodí	-
12	Ac	plocha povodí	km ²
13	mean.slope.	průměrný sklon povodí	-

Hodnoty nasyčené hydraulické vodivosti SHC byly získány z databáze STATSGO - údaje poskytované Penn State Earth System Science Center. Klasifikace půdních typů podle USDA byla základem odvození relativního zastoupení těžkých půd na povodí (Miller a White, 1998). Relativní zastoupení lesních porostů Fo a zastoupení urbanizovaných ploch Ur vycházely z klasifikace IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) (Loveland, 2000). Hodnoty deskriptoru pokryvnost povodí byly odvozeny z NDVI dat, zde byla uvažována pokryvnost povodí mimo vegetační sezónu (únor) (Gutman, 1998). Morfologické charakteristiky (mean.elev, elev.iqr, Ac, slope) a souřadnice těžiště povodí (Xc a Yc) byly odvozeny digitálním modelem GTOPO30 s prostorovým rozlišením 30 obloukových sekund (vyvinutý US Geological Survey). k vyhledávání deskriptorově nejpodobnějších povodí. Souřadnice rozvodnic jednotlivých povodí byly obsaženy v datovém souboru projektu MOPEX, tyto byly použity pro výpočet plochy povodí (Ac), souřadnic těžiště (Xc, Yc), průměrné

nadmořské výšky (mean.elev), průměrného sklonu povodí (slope) a mezikvartilového rozpětí nadmořských výšek (elev.iqr).

4.2 POPIS POUŽITÉHO MODELU, OPTIMALIZAČNÍHO ALGORITMU A HODNOTÍCÍCH KRITÉRIÍ

4.2.1 MODEL GR4J

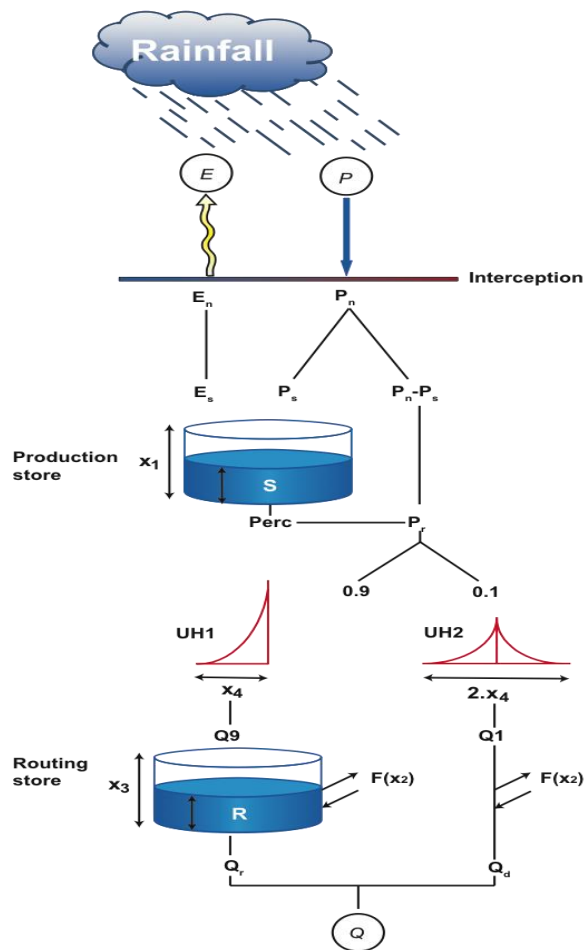
Pro zpracování problematiky řešené v této diplomové práci byl vybrán model GR4J (Mode'le du Ge'nie Rural a' 4 parame'tres Journalier). Jedná se o celistvý konceptuální srážko-odtokový model, jehož schéma je prezentováno na obr. č. 2. Vývoj GR4J modelu byl iniciován Claudem Michelem na začátku roku 1980 v Cemagref ve Francii (Michel et al., 2006). První verze modelu měla pouze jeden parametr. Model prošel 4 hlavními fázemi vývoje, z nichž je za nejlepší považována verze modelu, jež navrhl Perrin (2000 – 2003). Následné verze GR4J byly rozsáhle testovány na velkých sadách povodí ve Francii, ale i v jiných zemích pomocí náročného testovacího rámce (Andréassian et al., 2009). GR4J model také byl porovnáván s jinými hydrologickými modely, při nichž poskytl poměrně dobré výsledky (Perrin et al., 2001; 2003).

Model GR4J operuje v denním časovém kroku a obsahuje 4 kalibrovatelné parametry:

- X 1: maximální kapacita produkčního zásobníku (mm),
- X 2: výměnný koeficient povodí (mm),
- X 3: maximální jednodenní kapacita transformačního zásobníku (mm),
- X4:UH1 časový parametr jednotkového hydrogramu (den)

Podrobný popis modelu GR4J je uveden ve studii Perrina (2003).

Vstupními daty modelu jsou časové řady srážek a potenciální evaporace. Výstupy jsou časové řady efektivní srážky a celkového odtoku. Tyto časové řady mají stejnou délku jako vstupy.



Obr. č. 2: Schématický diagram modelu GR4J (<https://ewater.atlassian.net/wiki/display/SD41/GR4J+-+SRG>)

Model GR4J byl sestaven v programu R za pomoci nainstalovaného softwarového balíku Hydromad. Sestavení modelu GR4J v prostředí Hydromadu je provedeno tímto příkazem: **model = hydromad (data, sma = "gr4j", routing = "gr4jrouting", parametry, nastaveni)**. Kde **data** označují vstupní datový soubor obsahující srážky, potenciální evaporaci a celkový odtok (ten není vstupem do modelu, ale slouží k výpočtu hodnotícího kritéria). Poté následuje vlastní sestavení struktury modelu GR4J pomocí dvou funkcí: **sma** (modul půdní vlhkosti) a **routing** (transformační modul). Příkaz **parametry** definuje hodnoty parametrů modelu, tyto lze zadávat přímo ve formě konkrétních hodnot (npř.: $x_1 = 1000\text{mm}$) nebo pro účely kalibrace ve formě intervalu (např.: $x_1 = c(1, 3000)$). Příkaz **nastaveni** obsahuje uživatelem definované počáteční

zásoby v modelu (S_0 a R_0) a možné využití warming up periody a její délky. Existují také další nastavení modelu, ale tato nebyla v rámci této práce využita (Andrews, 2011).

4.2.2 OPTIMALIZAČNÍ ALGORITMUS DIFERENCIÁLNÍ EVOLUCE

Algoritmus diferenciální evoluce je jedním z mnoha algoritmů evolučních technik. Je určen konkrétním způsobem mutace a křížení a obecně je známo, že dosahuje dobrých výsledků. Diferenciální evoluci vyvinuli v roce 1995 Kenneth V. Price a Dr. Rainer Storm. Algoritmus vznikl úpravou genetického žihání pro řešení složitějších problémů. Původní binární reprezentace byla nahrazena dekadickou a logické operace vektorovými. Po přidání principu diferenciální mutace byly ovšem prvky genetického žihání uznány za nadbytečné a z diferenciální evoluce byly vypuštěny. Mezi parametry diferenciální evoluce patří například práh křížení (CR), dimenze problému (D), velikost populace (NP), mutační konstanta (F) (Kazíková, 2013).

Mutace spočívá ve vytvoření tzv. šumového vektoru za použití náhodně vybraných rodičů a mutační konstanty. K vytvoření šumového vektoru byly použity 3 rodiče. Konkrétní způsob jeho vzniku záleží na zvolené mutační strategii. Možností tvorby šumového vektoru je mnoho. V této práci byla použita mutační strategie **DE / rand / 1 / bin**, kde DE určuje, že se jedná o diferenciální evoluci, rand je vybraný aktivní prvek, 1 udává počet diferencí vektorů potřebných k mutaci rand (tedy 1 mutace) a bin je strategie křížení. Po mutaci nastává křížení.

Křížením vytvoříme ze šumového vektoru a čtvrtého rodiče nového jedince, kterému budeme říkat zkušební (trial) vektor. Jeho vznik závisí na zvolené strategii, náhodně generovaném čísle a velikosti CR. Binární strategie křížení (Bin) vychází z náhodně vygenerovaného čísla a hodnoty prahu křížení CR. Odpovídající dvojice parametrů (první parametr šumového vektoru s prvním parametrem aktivního rodiče, druhý s druhým, atd.) vždy vybere právě jeden a to v závislosti na náhodně generované hodnotě. Je-li náhodná hodnota nižší nežli práh křížení CR, bere se parametr ze šumového vektoru, v opačném případě pak z aktivního rodiče (Zelinka, 2002; Kazíková, 2013).

Metoda diferenciální evoluce se v balíku Hydromad zadává pomocí následujícího příkazu: **fitByDE (model, control = DEoptim.control(strategy = 1, CR = 0.5, F = 1.0))**. Kde **model** je předem definovaná struktura modelu s časovou řadou použitou při kalibraci, **strategy** odkazuje na vybranou mutační strategii (zde použita DE / rand / 1 / bin), **CR** udává hodnotu parametru křížení a **F** hodnotu mutační konstanty (Andrews, 2011).

4.2.3 HODNOTÍCÍ KRITÉRIA

Pro vyhodnocení simulační účinnosti modelu byla použita 3 hodnotící kritéria. Základním byla objektivní funkce Nash Sutcliffeův koeficient shody (Nash & Sutcliffe, 1970):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{o,t} - Q_{t,m})^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{o,t} - Q_o)^2}$$

kde $Q_{o,t}$ (mm) je hodnota simulovaného odtoku v časovém kroku t , $Q_{m,t}$ (mm) je hodnota zaznamenaného odtoku v časovém kroku t a Q_o (mm) je aritmetický průměr zaznamenaných odtoků. Pro dokonalou shodu mezi zaznamenanými a simulovanými odtoky platí, že $NS = 1$, čím blíže je získaná hodnota k 1, tím je model přesnější (Nash & Sutcliffe, 1970, Gupta, 2007).

Zbývající dvě použitá hodnotící kritéria byly modifikace Nash Sutcliffeova koeficientu shody. První využívá druhých odmocnin měřených a simulovaných odtoků pro výpočet kritéria (označena dále v textu jako NSsqr). Druhá využívá logaritmů měřených a simulovaných odtoků pro výpočet kritéria (označena dále v textu jako NSlog). V případě výpočtu kritéria NSlog byla kvůli možným nulovým hodnotám odtoků v časových řadách k simulovaným a měřeným odtokům připočtena konstanta, kterou byl 10% percentil vypočtený z nenulových hodnot použité časové řady měřených odtoků.

V rámci této práce byly pro jednotlivá hodnotící kritéria v balíku Hydromad použity tyto příkazy:

NS = objFunVal(model, hmadstat("r.squared"))

NSsqr = objFunVal(model, hmadstat("r.sq.sqrt"))

NSlog = objFunVal(model, hmadstat("r.sq.log"))

Kde **model** je sestavená struktura modelu s časovou řadou a parametry modelu (Andrews, 2011).

4.3 POPIS REGIONALIZAČNÍ METODY

Jako regionalizační metoda byla vybrána regionalizace založena na fyzikální podobnosti povodí. K vyhledávání nejpodobnějších pozorovaných povodí k nepozorovanému povodí byla použita metoda RAS (Rank-accumulated similarity method) (Zhang, 2009; Oudin et al., 2008). Princip metody RAS můžeme shrnout do následujících kroků: 1) výpočet absolutních hodnot odchylek mezi deskriptorem A nepozorovaného povodí a deskriptory A všech pozorovaných povodí, 2) přiřazení pořadí jednotlivým pozorovaným povodím podle velikosti odchylky (hodnota 1 je přiřazena pozorovanému povodí s nejnižší hodnotou odchylky deskriptoru A, hodnota 2 je přiřazena pozorovanému povodí s druhou nejnižší hodnotou odchylky deskriptoru A). Pokud je k vyhledávání nejpodobnějších povodí použito více deskriptorů, pak je celý postup opakován pro každý deskriptor. Nakonec je stanoveno celkové pořadí jednotlivých pozorovaných povodí jako aritmetický průměr dílčích pořadí. Každému deskriptoru je v tomto procesu přiřazena stejná váha. K určení parametrické sady na nepozorovaném povodí lze použít metodu single donor (parametrická sada nejpodobnějšího pozorovaného povodí je použita na nepozorovaném povodí), nebo multiple donor. V tomto případě je parametrická sada na nepozorovaném povodí vypočtena jako vážený průměr parametrických sad vybraného počtu deskriptorově nejpodobnějších pozorovaných povodí (Zhang, 2009; Oudin et al., 2008):

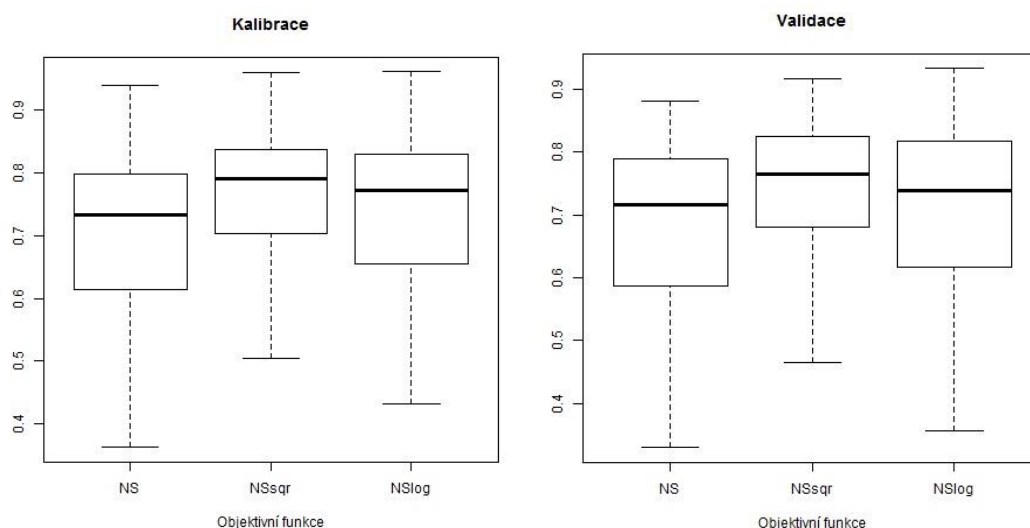
$$Pn_i = \sum_{j=1}^N w_j Pp_i^j / \sum_{j=1}^N w_j ,$$

kde Pn_i je hodnota i -tého parametru na nepozorovaném povodí, Pp_i^j je hodnota i -tého parametru donoru j , w_j je váha spojená s donorem j , $j = 1$ až N je celkový počet vybraných donorů. Převrácené hodnoty celkových pořadí byly použity jako váhy.

5 VÝSLEDKY

5.1 KALIBRACE A VALIDACE MODELU GR4J

Kalibrace modelu GR4J na každém ze 176 povodí byla provedena na základě příslušných časových řad srážek potenciální evaporace a odtoku. Pro každé povodí byly ke kalibraci použity desetileté časové řady (1. 1. 1970 až 31. 12. 1979) s jednoletou „warming-up“ periodou. Simulační účinnost modelu v kalibrační fázi byla hodnocena pomocí tří kritérií: NS, NSsqr a NSlog. Nakalibrovaný model byl následně verifikován na validačních časových řadách (1. 1. 1980 až 31. 12. 1989) s jednoletou „warming-up“ periodou. Výsledky kalibrace a validace modelu na souboru 176 povodí formou použitých kritérií jsou prezentovány na obrázku č. 3.



Obr. č. 3: Výsledky kalibrace (vlevo) a validace (vpravo) modelu GR4J na souboru 176 MOPEX povodí.

Krabicové grafy použité v této diplomové práci ukazují vždy dolní kvartil, medián a horní kvartil a vousy ukazují 1,5-násobek interkvartilového rozpětí. Z obrázku č. 3 vlevo jsou patrné relativně podobně vysoké hodnoty NSsqr (s mediánem 0,79) a NS log (s mediánem 0,77), což ukazuje, že model GR4J dobře simuloval nízké a střední hodnoty odtoku. Určitý pokles simulační účinnosti hodnocený formou NS ve srovnání s hodnotami NSsqr a NSlog v kalibrační fázi ukazuje, že model GR4J hůře simuloval vysoké odtoky, na které je toto hodnotící kritérium velmi citlivé. Výsledky validace modelu (obr. č. 3 vpravo) ukazují výsledky podobné kalibraci z hlediska porovnání

všech tří použitých kritérií (s mediány NS o hodnotě 0,72, NSsqr o hodnotě 0,76 a NSlog o hodnotě 0,74). Z obr. č. 3 je dále patrný nevýrazný pokles simulační účinnosti při přechodu z kalibrační do validační fáze (poklesy mediánů hodnotících kritérií nepřesáhly hodnotu 0,03).

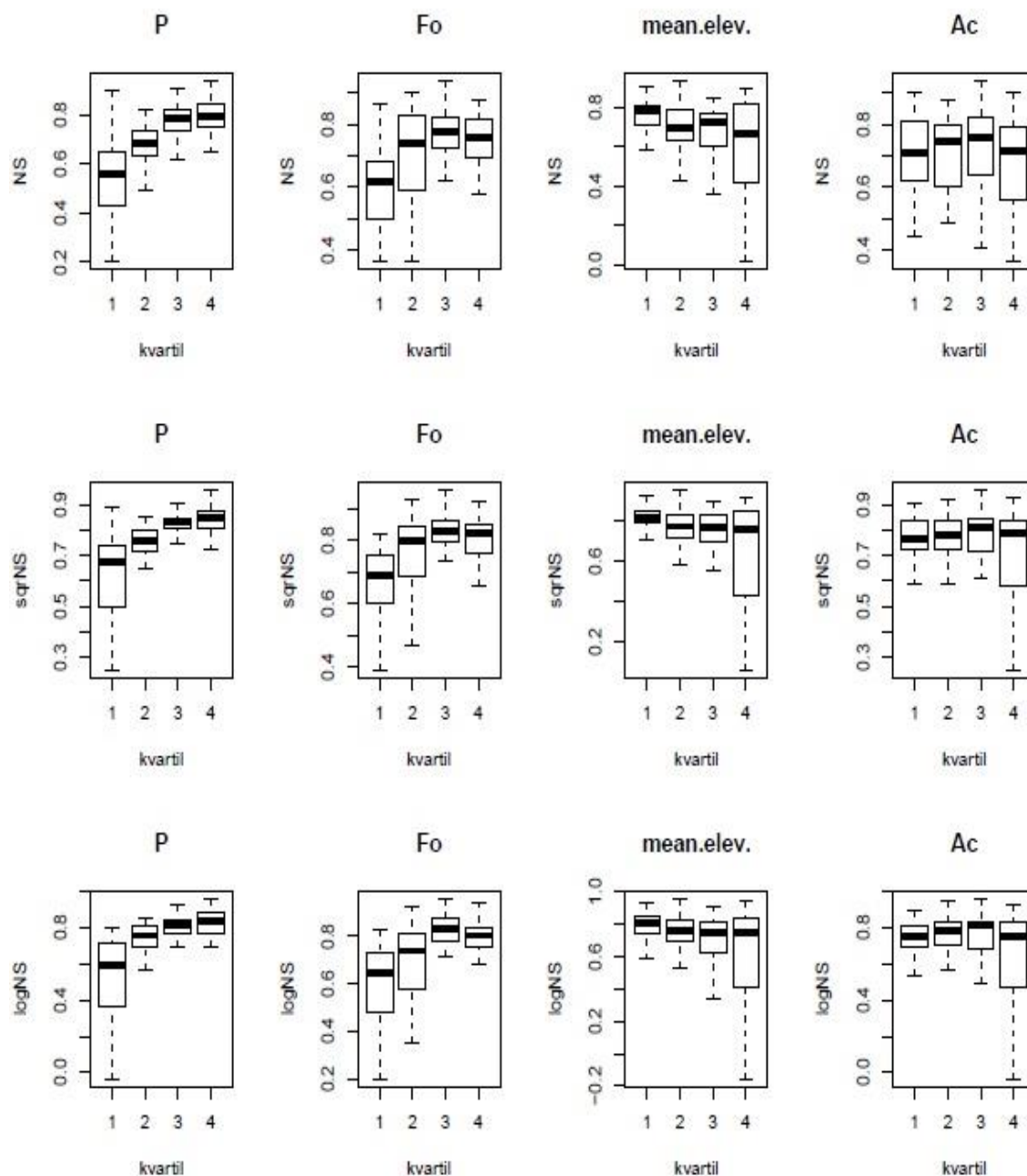
5.2 ANALÝZA VZTAHU MEZI SIMULAČNÍ ÚČINNOSTÍ MODELU A CHARAKTERISTIKAMI POVODÍ

Vztah mezi simulační účinností modelu GR4J a každou charakteristikou povodí byl analyzován následujícím způsobem. Všechna povodí byla seřazena podle zvolené charakteristiky od její nejmenší hodnoty po největší hodnotu. Takto seříděný soubor povodí byl dále rozdělen do čtyř skupin. V první skupině byla povodí spadající do prvního kvartilu podle zvolené charakteristiky, ve druhé skupině byla přítomna povodí spadající do druhého kvartilu atd. Pro každou skupinu povodí příslušející dané charakteristice povodí byly vypočteny mediány a další percentily na základě simulačních účinností dosažených při kalibraci modelu.

Výsledky analýzy jsou prezentovány formou grafů na obr. č. 4 a v příloze 1. Obr. č. 4 ukazuje vliv vybraných charakteristik povodí na simulační účinnost modelu pro 4 vybrané charakteristiky: průměrnou roční srážku (P), relativní zastoupení lesních porostů na povodí (Fo), průměrnou nadmořskou výšku (mean.elev.) a plochu povodí (Ac).

Pro klimatické charakteristiky průměrnou roční srážku (obr. č. 4 charakteristika P) a index aridity (příloha č. 1 charakteristika P/PE) bylo zjištěno, že s jejich zvyšující se hodnotou na povodí se zvyšuje simulační účinnost modelu hodnocená podle všech tří kritérií. Pokles simulační účinnosti modelu byl zaznamenán spolu se zvyšující se hodnotou relativního zastoupení těžkých půd na povodí (viz příloha č. 1 charakteristika CS). Naproti tomu, se zvyšující se hodnotou nasycené hydraulické vodivosti na povodí se zvyšovala simulační účinnost hodnocená formou NS a NSsqr. Z charakteristik popisujících vegetační kryt byl zaznamenán pozitivní vliv na simulační účinnost pouze u charakteristik Fo (obr. č. 4) a Gf (příloha č. 1), resp. s jejich zvyšující se hodnotou. Z morfologických charakteristik ovlivňovala simulační účinnost pouze průměrná

nadmořská výška povodí (obr. č. 4 charakteristika mean.elev.). Pro ostatní morfologické charakteristiky nebyla zaznamenána výraznější změna hodnotících kritérií mezi jednotlivými kvartily. Výrazný vliv na simulační účinnost měly také x- a y-souřadnice těžiště (příloha 1 charakteristiky Xc a Yc). Výsledky ukazují na zvyšování simulační účinnosti modelu při posunu těžiště povodí ze západu na východ a ze severu na jih.



Obr. č. 4: Vztah mezi simulační účinností modelu a charakteristikami povodí pro vybrané charakteristiky

Výsledky ukazují, že nejvýrazněji ovlivňují simulační účinnost klimatické charakteristiky, průměrná nadmořská výška, souřadnice těžiště, zastoupení lesních porostů na povodí a pokryvnost povodí. Lze předpokládat, že některé z těchto deskriptorů, nebo všechny mohou být základem měřítka podobnosti povodí.

5.3 REGIONALIZAČNÍ STUDIE NA SOUBORU MOPEX POVODÍ

Regionalizační studie byla provedena na souboru 176 povodí projektu MOPEX. Regionalizace byla založena na přístupu fyzikální podobnosti povodí. K vyhledávání deskriptorově nejpodobnějších povodí byla použita metoda RAS. Pro každé ze 176 MOPEX povodí byl sestaven soubor 13 charakteristik (viz. Tabulka č. 1).

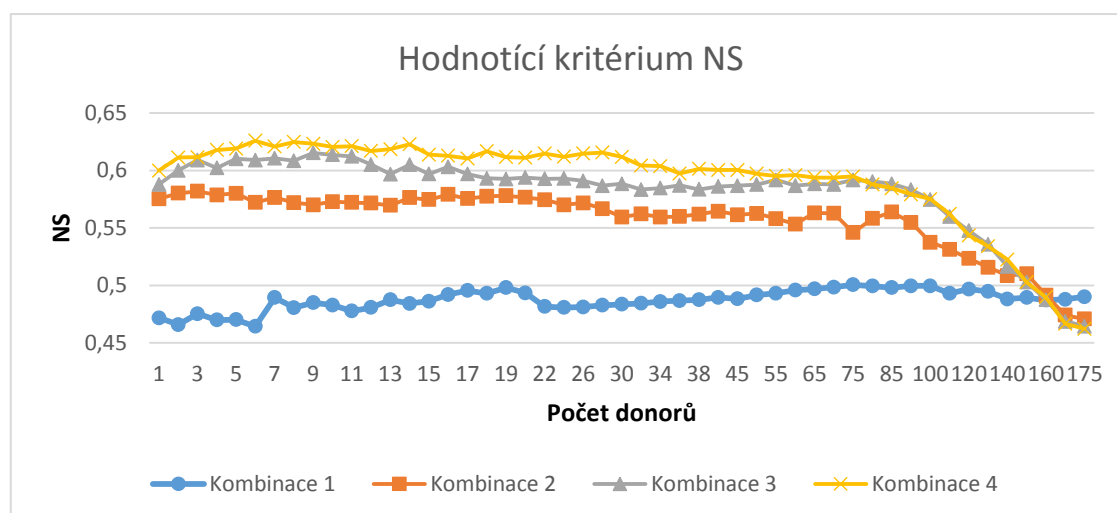
V rámci této studie bylo řešeno: 1) jaký vliv má zvolený počet donorů na simulační účinnost na nepozorovaném povodí, 2) jaké kombinace charakteristik povodí povedou k výběru nejvhodnějších donorů, 3) liší se tyto výsledky mezi sebou, pokud je simulační účinnost hodnocena různými kritérii (zde NS, NSsq a NSlog). K výběru optimálních kombinací charakteristik povodí byla použita metoda trial-and-error, v rámci které byly postupně testovány všechny kombinace s jednou až čtyřmi charakteristikami.

Vliv počtu donorů na simulační účinnost modelu na nepozorovaných povodích

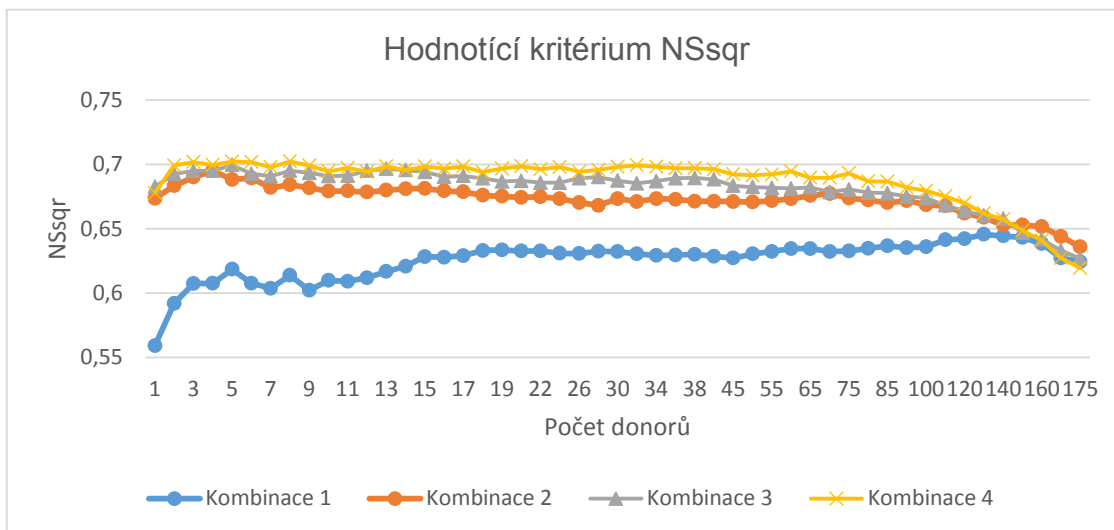
Z obrázku č. 5 je patrné, že při testování kombinací s jednou charakteristikou povodí byly identifikovány tři různé počty donorů, kde byla zaznamenána podobně vysoká simulační účinnost modelu (hodnocená formou mediánu NS): 7 donorů, 20 donorů a 75 donorů. Maximum bylo dosaženo při 75 donorech (medián NS byl 0,50). Při zvýšení počtu charakteristik v testovaných kombinacích došlo k poklesu optimálního počtu donorů (ty nepřesáhly hodnotu 10 donorů). Maximální simulační účinnosti vyjádřené formou mediánů NS byly 0,58 (3 donory a dvě charakteristiky v kombinaci), 0,62 (9 donorů a tři charakteristiky v kombinaci) a 0,63 (6 donorů a čtyři charakteristiky v kombinaci).

Z obrázku č. 6 je patrné, že při testování kombinací s jednou charakteristikou povodí byla zaznamenána nejvyšší simulační účinnost modelu (hodnocená formou mediánu NSsqr) při 130 donorech (medián NSsqr byl 0,65). Při zvýšení počtu charakteristik v testovaných kombinacích došlo k poklesu optimálního počtu donorů (ty nepřesáhly hodnotu 10 donorů). Maximální simulační účinnosti vyjádřené formou mediánů NSsqr byly 0,69 (4 donory a dvě charakteristiky v kombinaci), 0,70 (5 donorů a tři charakteristiky v kombinaci) a 0,70 (8 donorů a čtyři charakteristiky v kombinaci).

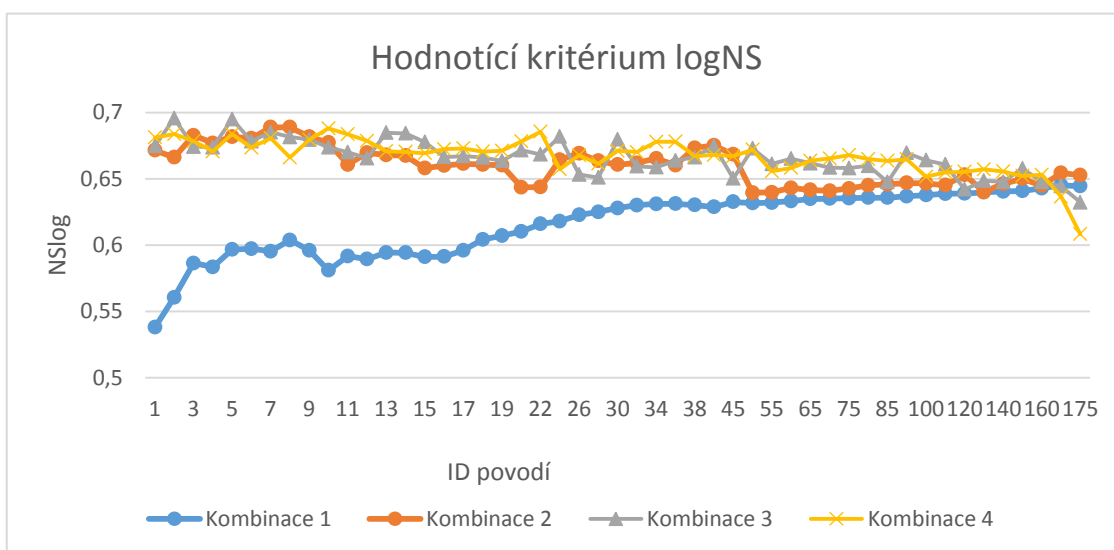
Z obrázku č. 7 je patrné, že při testování kombinací s jednou charakteristikou povodí byla zaznamenána nejvyšší simulační účinnost modelu (hodnocená formou mediánu NSlog) při 170 donorech (medián NSlog byl 0,65). Při zvýšení počtu charakteristik v testovaných kombinacích došlo k poklesu optimálního počtu donorů (ty nepřesáhly hodnotu 10 donorů). Maximální simulační účinnosti vyjádřené formou mediánů NSlog byly 0,69 (8 donorů a dvě charakteristiky v kombinaci). Při testování kombinací se třemi charakteristikami povodí byly identifikovány dva optimální počty donorů (2, 5), kde byla zaznamenána podobně vysoká simulační účinnost modelu, maximální hodnota byla 0,70 (2 donory a tři charakteristiky v kombinaci). Stejně tak při testování kombinací se čtyřmi charakteristikami povodí byly identifikovány dva optimální počty donorů (10, 22), kde byla zaznamenána podobně vysoká simulační účinnost modelu, maximální hodnota byla 0,70 (10 donorů a čtyři charakteristiky v kombinaci).



Obr. č. 5: Vliv počtu donorů na simulační účinnost modelu GR4J hodnocenou podle NS pro kombinace s jednou (kombinace 1) až čtyřmi (kombinace 4) charakteristikami povodí. Jednotlivé body zobrazují vypočtené mediány NS na základě simulačních účinností pro všech 176 povodí.



Obr. č. 6: Vliv počtu donorů na simulační účinnost modelu GR4J hodnocenou podle NSsq pro kombinace s jednou (kombinace 1) až čtyřmi (kombinace 4) charakteristikami povodí. Jednotlivé body zobrazují vypočtené mediány NSsq na základě simulačních účinností pro všech 176 povodí.



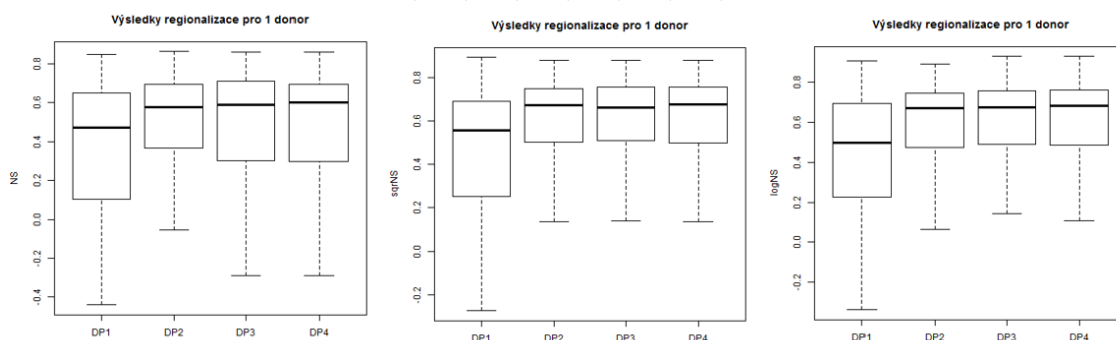
Obr. č. 7: Vliv počtu donorů na simulační účinnost modelu GR4J hodnocenou podle NSlog pro kombinace s jednou (kombinace 1) až čtyřmi (kombinace 4) charakteristikami povodí. Jednotlivé body zobrazují vypočtené mediány NSlog na základě simulačních účinností pro všech 176 povodí.

Výsledky prezentované na obrázcích 5, 6 a 7 ukazují, že s růstem počtu donorů klesá simulační účinnost modelu pro jednotlivá hodnotící kritéria, pro jednu charakteristiku v

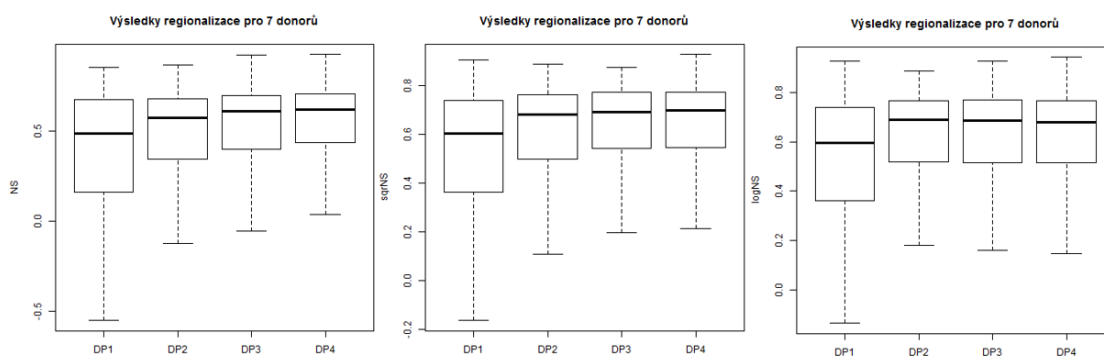
kombinaci má křivka opačný průběh. S rostoucím počtem prvků v kombinacích simulační účinnost modelu pro jednotlivá kritéria roste. V rámci každého grafu pro každé hodnotící kritérium je patrný velký rozdíl mezi křivkou pro 1 charakteristiku v kombinaci a mezi křivkou znázorňující 2 a více charakteristik v kombinaci. Pro jeden donor je tento rozdíl až 0,20, se zvyšujícím počtem donorů se tento rozdíl zmenšuje až na minimum, což je 0,01. Křivky pro kombinace s 2 až 4 charakteristikami pro NSlog jsou dosti rozkolísané. Přístup více donorů vede k lepším výsledkům, než přístup jednoho donoru bez ohledu na to jakým kritériem to bylo hodnoceno. I když obecně hodnotící kritérium NSlog potřebuje nepatrně vyšší počet donorů než zbývající kritéria.

Vliv počtu deskriptorů povodí na simulační účinnost modelu na nepozorovaných povodích

Dále byla provedena analýza vlivu charakteristik povodí a jejich počtu na simulační účinnost modelu na nepozorovaných povodích. Sledován byl vliv použitého hodnotícího kritéria na složení identifikovaných optimálních sad deskriptorů povodí. Výsledky analýzy jsou prezentovány na obr. č. 8 a 9 pro 1 donor a 7 donorů a dále v příloze č. 2 (obr. 10 – 12) pro 22, 100 a 175 donorů. Z prezentovaných obr. č. 8, 9 a 10, 11, 12 (v příloze č. 2) je patrný pozitivní vliv na simulační účinnost tak, jak se zvyšuje počet charakteristik povodí v optimální kombinaci. K nejvýraznější změně simulační účinnosti dochází při přechodu od kombinace s jednou charakteristikou ke kombinacím se dvěma charakteristikami pro všechna hodnotící kritéria. Další přidání charakteristiky povodí v identifikovaných kombinacích vedou pouze k nepatrným změnám v simulačních účinnostech. Nicméně tyto výsledky jsou typické pouze, pokud je používán nízký počet donorů pro stanovení sady parametrů na nepozorovaném povodí. To je dobře patrné, pokud porovnáme výsledky pro 1 (obr. č. 8) nebo 7 donorů (obr. č. 9) s výsledky získanými při použití 100 (příloha 2, obr. č. 11) nebo 175 donorů (příloha č. 2, obr. č. 12). Výsledky dále ukazují, že tento vliv zvyšujícího se počtu donorů nejvíce ovlivňuje hodnotu kritéria NS.



Obr. č. 8: Vliv identifikovaných optimálních kombinací pro přístup 1 donoru na simulační účinnost modelu na nepozorovaných povodích hodnocených kritérii NS (vlevo), NSsq (uprostřed) a NSlog (vpravo).



Obr. č. 9: Vliv identifikovaných optimálních kombinací pro přístup 7 donorů na simulační účinnost modelu na nepozorovaných povodích hodnocených kritérii NS (vlevo), NSsq (uprostřed) a NSlog (vpravo).

Výsledky také ukazují, že identifikace optimální kombinace charakteristik povodí je závislá na počtu použitých donorů. Přesto existují optimální kombinace o daném počtu charakteristik, které byly identifikovány častěji než jiné. Přehled těchto kombinací je uveden v tabulce č. 2 i s jejich relativním zastoupením, které bylo počítáno jako poměr zastoupení dané kombinace k celkovému počtu identifikovaných optimálních kombinací (tento počet odpovídá celkovému počtu testovaných možností volby donorů a tedy hodnotě 175). Výsledky jsou v tabulce č. 2 uvedeny pro tři použitá hodnotící kritéria.

Tabulka č. 2: Relativní zastoupení nejčastějších kombinací charakteristik v závislosti na počtu prvků v kombinaci a na typu hodnotícího kritéria

Počet prvků v kombinaci	NS		NSsqr		NSlog	
	Kombinace chrakter.	Zastoupení (%)	Kombinace chrakter.	Zastoupení (%)	Kombinace chrakter.	Zastoupení (%)
1	mean.elev.	65	mean.elev.	75	mean.elev.	75
2	X Y	49	X Y	49	X Y	49
3	P mean.elev. Ac	33	mean.elev. X Y	16	mean.elev. X Y ar.ind. mean.elev. Y	14 14
4	Y Ac Gf mean.elev.	16	ar.ind. SHC Gf mean.elev.	14	ar.ind. SHC Gf mean.elev.	14

Tabulka č. 2 ukazuje pokles relativního zastoupení dominantních optimálních kombinací tak, jak se zvyšuje počet charakteristik v kombinaci (z 65 % až 75 % pro optimální kombinace s jednou charakteristikou po 14 % až 16 % pro optimální kombinace se 4 charakteristikami). V tabulce č. 2 můžeme vidět, že pro kritéria NSsqr a NSlog byla zjištěna velmi podobná relativní zastoupení dominantních optimálních kombinací, jejichž složení bylo navíc prakticky totožné. V tomto kontextu poněkud vybočují výsledky pro kritérium NS, jak pro relativní zastoupení dominantních optimálních kombinací tak i jejich složení (např. viz výsledky pro kombinace se třemi charakteristikami).

Dále bylo analyzováno zastoupení jednotlivých charakteristik povodí v optimálních kombinacích identifikovaných při různých hodnotících kritériích simulační účinnosti. Výsledky této analýzy jsou uvedeny v tabulce č. 3. Nejčastější charakteristikou povodí byla jednoznačně průměrná nadmořská výška povodí s relativním zastoupením více než 50 % pro 1 až 4 charakteristiky v kombinaci pro všechna hodnotící kritéria a

s maximálním zastoupením 98% pro tři charakteristiky v kombinaci a hodnotící kritérium NS. Druhou nejčastější charakteristikou byla y-ová souřadnice těžiště povodí, ovšem jen pokud optimální kombinace obsahovala více charakteristik. Naopak ojedinělou charakteristikou bylo relativní zastoupení těžkých půd na povodí, objevovalo se jen v zastoupení 4% pro čtyři charakteristiky v kombinaci pro hodnotící kritéria NSsqr a NSlog. Relativní zastoupení charakteristik povodí se v závislosti na tom, jak se měnil počet charakteristik v kombinaci, měnilo následovně: pro většinu charakteristik rostlo, respektive pro všechny kromě y-ové souřadnice těžiště povodí, kde klesalo od 2 do 4 charakteristik v kombinaci. Z tabulky č. 3 je patrný rozdíl výsledků pro hodnotící kritérium NS, které má mírně jiné rozložení zastoupených charakteristik než NSsqr a NSlog. Nejčastěji zastoupené charakteristiky v optimálních kombinacích odpovídají charakteristikám, které nejvíce ovlivňovali simulační účinnost modelu.

Tabulka č. 3: Relativní zastoupení (v %) jednotlivých charakteristik v kombinacích

Kritérium Kombinace Charakteristika	NS				NSsqr				NSlog			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	Procentuální zastoupení (%)											
P	2	-	39	40	2	-	-	6	2	-	-	4
P/PE	-	2	-	24	-	2	10	45	-	2	10	30
CS	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	4
SHC	-	-	8	16	-	-	18	40	-	-	18	53
Fo	-	-	2	12	6	-	31	20	6	-	32	20
Ur	33	10	4	8	16	10	33	89	16	10	28	30
Gf	-	8	20	30	-	8	-	44	-	8	16	42
mean.elev.	65	51	98	87	76	51	84	59	76	51	64	57
elev.iqr.	-	-	2	12	-	-	2	36	-	-	4	20
X	-	51	10	63	-	51	6	39	-	51	22	38
Y	-	78	47	32	-	78	33	16	-	78	36	14
Ac	-	-	67	4	-	-	6	10	-	-	6	10
mean.slope.	-	-	2	59	-	-	22	38	-	-	22	38

6 DISKUSE

Z výsledků kalibrace a validace modelu GR4J je patrné, že tento model lépe simuluje nízké a střední hodnoty odtoku. To může ukazovat na jisté strukturální problémy modelu. Na druhou stranu, toto může být také výsledkem nevhodně provedené kalibrace. Protože použité časové řady obsahují více nízkých a středních hodnot odtoku, může při kalibraci docházet k upřednostnění hodnotících kritérií NSsqr a NSlog, které jsou na tyto odtoky zaměřeny. Porovnáme-li simulační výsledky kalibrace a validace, pak nebyl zjištěn výraznější pokles simulační účinnosti modelu. To ukazuje na určitou robustnost použité modelové struktury a dostatečnou délku kalibračních dat (které obsahovaly dostatečně variabilní data).

Výsledky prezentované v kapitole 4.2 ukazují, že nejméně ovlivňují simulační účinnost modelu klimatické charakteristiky spolu s průměrnou nadmořskou výškou, souřadnicemi těžiště povodí a vybranými charakteristikami vegetačního krytu. Lepší simulační účinnosti modelu na humidních povodích můžeme spojit s vyšší linearitou srážko-odtokového procesu na těchto povodích. Naopak, aridní povodí jsou více prostorově heterogenní a srážko-odtokový proces je více nelineární. Z tohoto důvodu se zdá být struktura modelu GR4J na těchto povodích méně efektivní.

Vliv průměrné nadmořské výšky povodí je více komplikovaný a závislý na použitém souboru povodí. V základu můžeme předpokládat, že se zvyšující se průměrnou nadmořskou výškou stoupá celková srážka na povodí. Nicméně, také se zvyšuje dostupná voda pro výpar. Proto se zvyšující se nadmořskou výškou se zvyšuje aridita povodí. Parajka et al. (2013) ukázal, že tento předpoklad je pro povodí v USA platný. Porovnáme-li navíc obrázky č. 13 v příloze č. 14, můžeme si všimnout, že povodí s nejvyšší průměrnou nadmořskou výškou patří obecně mezi nejvíce aridní povodí.

Vliv souřadnic těžiště povodí můžeme spojit se složením souboru povodí, protože pro tento soubor platí, že aridita i průměrná nadmořská výška povodí klesají tak, jak se souřadnice těžiště povodí sune ze severu na jih a ze západu na východ. Nejlépe modelovaná povodí použitého souboru povodí se nachází na jihovýchodě USA kolem Apalačského pohoří.

Na rozdíl od výsledků, které prezentovali Parajka et al. (2013), nebyl zjištěn žádný výraznější vliv plochy povodí na simulační účinnost, přestože byl tento vztah očekáván. Tento výsledek můžeme spojit se složením použitého souboru povodí, neboť tento obsahoval převážně povodí s plochou 1000 km² až 4000 km². Právě chybějící větší počet malých povodí (s plochou do 500 km²) a výrazně velkých může být příčinou nenalezení tohoto vztahu.

Vliv deskriptorů vegetačního krytu (pouze Fo) a pokrývnosti můžeme spojit s tím, že tyto deskriptory korelují s klimatickými deskriptory. Vliv deskriptoru Ur (zastoupení urbanizovaných ploch) nebyl zaznamenán. Toto můžeme spojit s jeho velmi nízkou variabilitou napříč souborem povodí. A tedy informativnost tohoto deskriptoru by měla být minimální.

Výsledky regionalizační studie ukazují změnu simulační účinnosti modelu se změnou použitého počtu donorů, přičemž identifikovaný optimální počet donorů je závislý na počtu deskriptorů povodí v testovaných kombinacích a použitém hodnotícím kritériu. Identifikované optimální počty donorů jsou velmi podobné výsledkům, které prezentovali Oudin et al. (2008) a Zhang & Chiew (2009). Stejně jako v těchto studiích i zde platilo, že použití parametrických sad více donorů vede k lepším simulačním výsledkům než použití parametrické sady jednoho donoru. Tento výsledek lze odůvodnit vyhlazením možných chyb v simulaci odtoku z více zdrojů. Pokles optimálního počtu donorů tak, jak se zvyšoval počet deskriptorů v kombinaci, můžeme spojit se zvyšující se fyzikální a tedy i hydrologickou podobností mezi donorem a akceptorem. Proto je vhodnější spíše nižší počet deskriptorově podobnějších donorů.

Porovnáme-li optimální počty donorů identifikované při různých hodnotících kritériích, můžeme konstatovat, že pro NS a NSsqr byly získány podobné výsledky. Výrazněji se lišily výsledky pro NSlog (zde byl potřeba obecně vyšší počet donorů). Tento výsledek můžeme spojit s tím, že vyšší počet donorů může vyhladit a zprůměrovat hodnoty simulovaného odtoku. Samozřejmě sice dojde k výraznějším chybám u vysokých odtoků, ale tato chyba je kompenzována přesnějšími simulacemi nízkého odtoku, na kterou je kritérium NSlog primárně zaměřeno.

Simulační účinnost modelu se na nepozorovaných povodích zvyšuje s tím, jak se zvyšuje počet deskriptorů povodí v identifikované optimální kombinaci použité k vyhledávání donorů. Tuto skutečnost můžeme spojit s faktem, že se vzrůstající fyzikální podobností mezi donorem a akceptorem stoupá i jejich hydrologická podobnost. Podobné výsledky prezentovali i Oudin et al. (2008).

Výsledky prezentované na obr. 8, 9 a v příloze 2 na obr. 10 ukazují, že nejvýraznější zvýšení simulační účinnosti modelu bylo dosaženo při přechodu od optimální kombinace s jedním deskriptorem k optimální kombinaci se dvěma deskriptory. Další přidané deskriptory měly pouze marginální vliv na změnu simulační účinnosti modelu. Podobné výsledky opět uvádí i Oudin et al. (2008). Tyto výsledky můžeme spojit s výrazným zvýšením fyzikální a tedy i hydrologické podobnosti mezi donorem (donory) a akceptorem, jejíž příčinou může být vysoký informační obsah spojený s deskriptory v optimální dvouprvkové kombinaci. Je zajímavé, že těmito charakteristikami jsou převážně souřadnice těžiště povodí. Tento výsledek ukazuje na pozitivní vliv geografické blízkosti mezi donorem (či donory) a akceptorem.

Porovnáme-li výsledky prezentované v kapitole 5.2 (konkrétně jaké deskriptory nejvíce ovlivňovaly simulační účinnost modelu) a výsledky prezentované v tab. 3, můžeme si všimnout velké podobnosti mezi nimi. Tento výsledek je očekávatelný, neboť deskriptory, které nejvíce ovlivňují simulační účinnost modelu, by měly patřit mezi skupinu deskriptorů mající největší vliv na výsledné měřítko podobnosti mezi povodími. A proto tyto deskriptory by měly být nejvíce zastoupeny v identifikovaných optimálních kombinacích.

Jak již bylo zmíněno výše, mezi nejvíce informativními deskriptory byly i souřadnice těžiště povodí. Nicméně tyto deskriptory nepopisují fakticky žádnou tradiční charakteristiku povodí (jako např. plocha povodí, průměrný sklon povodí a jiné), ale kvantifikují podobnost jinak. Povodí, která jsou geograficky velmi blízko u sebe, mohou mít velmi podobné některé jiné deskriptory, zejména se to týká klimatických deskriptorů. V tomto ohledu, mohou souřadnice těžiště tyto charakteristiky zastoupit. V rámci použitého datového souboru je toto zastoupení velmi patrné, neboť bylo zjištěno, že index aridity povodí a jeho průměrná nadmořská výška se mění v daných směrech (ze severu na jih a ze západu na východ) změny souřadnic těžiště povodí. Tato

zástupnost mohla být příčinou relativně nízkého zastoupení klimatických deskriptorů v identifikovaných optimálních kombinacích.

Výsledky prezentované v tab. 2 a 3 ukazují velkou podobnost optimálních deskriptorů povodí, pokud bylo jako hodnotící kritérium použito NS, NSsqr a NSlog. Tento výsledek ukazuje, že vliv hodnotícího kritéria simulační účinnosti nemá příliš velký vliv na výběr optimální kombinace deskriptorů povodí případně zastoupení jednotlivých deskriptorů v optimálních kombinacích. Přestože existují určité rozdíly ve složení optimálních kombinací identifikovaných pro kritérium NS a kritéria NSsqr a NSlog, nelze zde ale hovořit o nějakém významném rozdílu. K rozdílu dochází až při testování kombinací se třemi deskriptory, avšak zde již nenastává výraznější změna simulační účinnosti. Pravděpodobným vysvětlením marginálního vlivu použitých hodnotících kritérií na identifikaci optimální kombinace deskriptorů povodí je jejich velká podobnost v tom smyslu, jak je proveden jejich výpočet. Rozdíl mezi nimi je pouze ve vstupech (netransformované versus transformované hodnoty odtoků), která tato kritéria používají.

7 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byla analýza vlivu výběru deskriptorů povodí na simulační účinnost modelu GR4J na nepozorovaných povodích za použití regionalizace založené na fyzikální podobnosti povodí.

K analýze tohoto vlivu bylo použito souboru 176 nepozorovaných povodí projektu MOPEX nacházejících se na území USA. K vyhodnocení bylo zapotřebí 3 hodnotících kritérií, a to Nash-Sutcliffeova koeficientu shody (NS) a jeho dvou modifikací, které využívají transformované hodnoty měřených a simulovaných odtoků (NSsq a NSlog). V rámci regionalizace založené na fyzikální podobnosti byla k vyhledávání nejpodobnějších pozorovaných povodí k nepozorovanému povodí použita metoda RAS.

Na základě dílčích výsledků bylo zjištěno, že model GR4J lépe simuluje nízké a střední hodnoty odtoku. Simulační účinnost modelu nejvíce ovlivňují klimatické charakteristiky spolu s průměrnou nadmořskou výškou a souřadnicemi těžiště povodí.

Výsledky regionalizační analýzy ukazují, že přístup více donorů vede k lepším výsledkům, než přístup jednoho donoru bez ohledu na použité hodnotící kritérium. I když obecně hodnotící kritérium NSlog preferuje nepatrně vyšší počet donorů než zbývající kritéria. Simulační účinnost modelu se na nepozorovaných povodích zvyšuje s tím, jak se zvyšuje počet deskriptorů povodí v identifikované optimální kombinaci použité k vyhledávání donorů. K nejvýraznějšímu zvýšení simulační účinnosti modelu došlo při přechodu od optimální kombinace s jedním deskriptorem k optimální kombinaci se dvěma deskriptory. Další přidané deskriptory neměly téměř žádný vliv na změnu simulační účinnosti modelu. V optimálních kombinacích dominovali opět především průměrná nadmořská výška a souřadnice těžiště povodí, a to ve výsledcích pro všechna hodnotící kritéria. Získané výsledky ukazují minimální vliv zvoleného hodnotícího kritéria simulační účinnosti na identifikaci optimálních sad deskriptorů povodí použitých při výběru vhodných donorů.

8 PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

Seznam použitých českých zdrojů

DAŇHELKA, J., KREJČÍ, J., ŠÁLEK, M., ŠERCL, P., ZEZULÁK, J., 2003. Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. (Výstup grantového projektu). Praha: ČZU + ČHMÚ.

KOVÁŘ P., 1990: Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích. Vysoká škola zemědělská v Praze.

KAZÍKOVÁ A., 2013: Algoritmus Diferenciální Evoluce s prvky deterministického chaosu (ChaosDE) v prostředí C/C++, Bakalářská práce, Fakulta aplikované informatiky, UTB ve Zlíně, 9 – 18s.

KULHAVÝ Z. & KOVÁŘ P., 2000: Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. VÚMOP, Praha.

ZEMAN E., 1994: Hydroinformatika a hydrologické modely. Habilitační práce, ČVUT, Praha.

ZELINKA, I., 2002: Umělá inteligence v problémech globální optimalizace. 1. vyd. Praha: BEN -technická literatura, ISBN 80-7300-069-5.

Seznam použitých zahraničních zdrojů

ACREMAN M. C. & SINCLAIR C. D., 1986: Classification of drainage basins according to their physical characteristics; an application for flood frequency analysis in Scotland, J. Hydrol., 84, 365– 380.

ANDREWS F., 2011: Hydromad Tutorial, online:
<http://hydromad.catchment.org/downloads/tutorial.pdf>, cit. 25. 1. 2016

ANDREWS F. T., CROKE B. F. W., JAKEMAN A. J., 2011: An open software environment for hydrological model assessment and development, Preprint submitted to Environmental Modelling and Software.

ANDRÉSSIAN V., PERRIN C., BETHET L., LE MOINE N., LERAT J., LOUMAGNE C., OUDIN L., T. MATHEVET, RAMOS M. H., VALÉRY A., 2009: Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models, Hydrol. Earth. Syst. Sci., 13, 1757-1764.

BEVEN K., 1989: Changing ideas in hydrology-the case of physically-based models, Journal of Hydrology, 105, 157s-172s.

BEVEN K. J., LAMB R., QUINM P., ROMANOWITZ R., FREER J., 1995: TOPMODEL, In: Computer models of watershed hydrology, Singh V. P. (Ed.), Water Resources Publications, USA, pp.627-668.

BEVEN K.J., FREER J., HANKIN B., SCHULZ K., 2000: The use of generalized likelihood measures for uncertainty estimation in higher-order models of environmental systems. In: Fitzgerald, Smith, R.C., Walden, A.T., Young, P.C. (Eds.), Nonlinear and Nonstationary Signal Processing. Cambridge University Press, UK.

BLÖSCHL G., SILVAPLAN M., 1995: Scale issues in hydrological modelling—a review. Hydrol. Process. 9, 251–290.

BOYLE D. P., GUPTA H. V., SOROOSHIAN S., 2001: Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods, WaterResources Research, 36, 3663s-3674s.

- BURN D. H., 1989: Cluster analysis as applied to regional flood frequency. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 115, 567s-582s.
- BURMASH R. J. G., FERRAL R. L., MCGUIRE R. A., 1973: A Generalized Streamflow Simulation System. Conceptual Modeling for Digital Computers, U. S. Dept. of Commerce: National Weather service and State of California, Dept. of Water Resources.
- CHOW V. T., MAIDMENT D. R., MAYS L. W., 1988: *Applied Hydrology*, McGraw-Hill Inc., 572s, ISBN 0-07-010810-2.
- CLARKE, R. T, 1973: A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use, *Journal of Hydrology*, 19, 1s-20s.
- DALY C., NEILSON R. P., PHILLIPS D. L., 1994: A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology* 33 (2), 140-158.
- DAWSON C. W, ABRAHART R. J., SEE L. M., 2007: HydroTest: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. *Environmental Modelling & Software* 22: 1034-1052.
- DINGMAN, S. L., 2002: *Physical hydrology*. Prentice Hall, ISBN 10: 0130996955.
- DIERMANSE F. L. M., 2001: Physically based modelling of rainfall-runoff processes, PhD Thesis, Delft University Press, 234s, ISBN 90-407-2154-8.
- DISKIN M. H., SIMON E., 1977: A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models, *Journal of Hydrology*, 34, 129s-149s.
- DOOGE J. C. I., 1986: *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 22, NO. 9, 46S-58S.

DUAN Q., SCHAAKE J., ANDRÉASSIAN V., FRANK S., GOTETI G., GUPTA H. V., GUSEV Y. M., HABET F., HALL A., HAY L., HOGUE T., HUANG M., LEAVESLEY G., LIANG X., NASONOVA O. N., NOILHAN J., OUDIN L. SOROOSHIAN S., WAGENER T., WOOD E. F., 2006: Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops, *Journal of Hydrology* 320, 3–17.

DECKERS D. L. E. H., BOOIJ M. J., RIENTJES T. H. M., KROL M. S. 2010: Catchment variability and parameter estimation in multiobjective regionalisation of a rainfall–runoff model. *Water Resour. Manag.* in press, doi:10.1007/s11269-010-9642-8.

FARNSWORTH R. K., THOMPSON E. S., Peck, E. L., SERVICE U. S. N. W., 1982. *Evaporation Atlas for the Contiguous 48 United States*. NOAA technical report NWS. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service.

FELDMAN A.D. (Ed.), 2000: *Hydrologic Modeling System HEC-HMS – Technical Reference Manual*. US Army Corps of Engineers, Washington, 149.

GUPTA H. V., VRUGT J. A., DIKS C. G. H., BOUGHTEN W., VERSTRATEN J. M., 2005: Improved Treatment of Uncertainty in Hydrologic Modeling: Combining the Strengths of Global Optimization and Data Assimilation, *Water Resources Research*, 41(1).

GUPTA H., YADAV M., WAGENER T., 2007: Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins, *Advances in Water Resources* 30, 1756–1774.

GUTMAN G., IGNATOV A., 1998: The derivation of the green vegetation fraction from noaa/avhrr data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing* 19 (8), 1533-1543.

HUNDECHA, Y., BÁRDOSSY A. 2004: Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model, *J. Hydrol.*, 292, 281– 295.

IBBIT, R. B., 1972: Effects of random data errors on the parameter values for a conceptual model, *Water Resources Research*, 8, 70s-78s.

KAY, A. L., JONES D. A., CROOKS S. M., CALVER A., REYNARD N. S., 2006: A comparison of three approaches to spatial generalization of rainfall-runoff models, *Hydrol. Processes*, 20, 3953– 3973.

KRONENBERG R., GÜTTLER T., FRANKE J., BERNHOFER CH., 2013: Application of Synthetic Meteorological Time Series in BROOK90: A Case Study for the Tharandt Forest in Saxony, Germany, *Open Journal of Modern Hydrology*, 3, 214-225.

LOVELAND T. R., REED B. C., BROWN J. F., OHLEN D. O., ZHU Z., YANG L., MERCHANT, J. W., 2000: Development of a global land cover characteristics database and igbp discover from 1 km avhrr data. *International Journal of Remote Sensing* 21 (6-7), 1303-1330.

MCCUEN R., KNIGHT Z., CUTTER A., 2006: "Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index." *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597), 597-602.

MCINTYRE N., LEE H., WHEATER H., 2005: Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments, *Water Resources Research*, 41, W12434, doi:10.1029/2005WR004289.

MERZ R., BLÖSCHL G., 2004: *Journal of Hydrology* 287, 96.

MILLER, D. A., WHITE R. A., 1998: A conterminous united states multi layer soil characteristics data set for regional climate and hydrology modeling. *Earth Interactions* 2 (2), 1-26.

MICHEL C., PERRIN C., ANDRÉASSIAN V., OUDIN L., MATHEVET T., 2006: Has basin-scale modelling advanced beyond empiricism? In: Andréassian, V., Hall, A., Chahinian, N. and Schaake, J. (eds) *Large sample basin experiments for hydrological model parameterization: results of the model parameter experiment (MOPEX)* pp. 108-116. IAHS Publication 307.

MULETA M. K., NICKLOW J. W., 2009: Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model, *Journal of Hydrology*, 306,127s-145s.

NASH J. E., SUTCLIFFE J. V., 1970: River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282s-290s.

NATHAN R. J., MCMAHON T. A., 1990: Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation, *J. Hydrol.*, 121, 217– 238.

LOUDIN L., ANDRÉASSIAN V., PERRIN C., MICHEL C., LE MOINE M., 2008: Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44.

PARAJKA J., MERZ R., BLÖSCHL G., 2005: A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, 157s–171s.

PARAJKA J., VIGLIONE A., ROGGER M., SALINAS J. L., SILVAPLAN M., BLÖSCHL G., 2013: Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 1: Runoff-hydrograph studies, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 1783–1795.

PERRIN C., MICHEL C., ANDRÉASSIAN V., 2001: Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments, *J. Hydrol.*, 242, 275–301.

PERRIN C., MICHEL C., ANDRÉASSIAN V., 2003: Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, *J. Hydrol.*, 279, 275-289.

POST D.A., JONES J.A., GRANT G.E., 1998: An improved methodology for predicting the daily hydrologic response of ungauged catchments. *Env. Mod. Software* 13, 395–403.

SCHAEFLI B., GUPTA H. V., 2007: Do Nash values have value?, *Hydrol. Process.*, 21, 2075–2080, doi:10.1002/hyp.6825.

SILVAPLAN M., TAKEUCHI, K., FRANKS S. W., GUPTA V.K., KARAMBIRI, H., LAKSHMI V., LIANG X., MCDONNELL J.J., MENDIONGO E. M., O'CONNELL, P. E., 2003: IAHS decade on Predictions of Ungauged Basins (PUB): Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Science Journal*, 48 (6), 857 - 879.

SOROOSHIAN S., GUPTA V. K., 1995: Model calibration, in Singh, V. P. (Ed.), *Computer models of watershed hydrology*, Water Resources Publication, 23s-68s.

WAGENER, T., WHEATER H. S., GUPTA H.V., 2004: *Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments*. Imperial College Press, London, 300s, ISBN 1-86094-466-3.

WAGENER, T., WHEATER, H. S., 2006: Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty, *Journal of Hydrology*, 320, 132s-154s.

WHEATER, H.S., JAKEMAN A.J., BEVEN K.J., 1993: Chapter 5 – Progress and directions in rainfallrunoff modeling. In: Jakeman, A.J., Beck, M.B. and McAleer, M.J. (eds). Modeling change in environmental systems. John Wiley & Sons, UK, 101-132.

XU C. Y., 1999: Estimation of Parameters of a Conceptual Water Balance Model for Ungauged Catchments, *Water Resources Management* 13: 353–368.

YADAV M., WAGENER T., GUPTA H., 2007: Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins, *Advances in Water Resources* 30, 1756–1774.

YOUNG A.R., 2006: Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 320, 155s–172s.

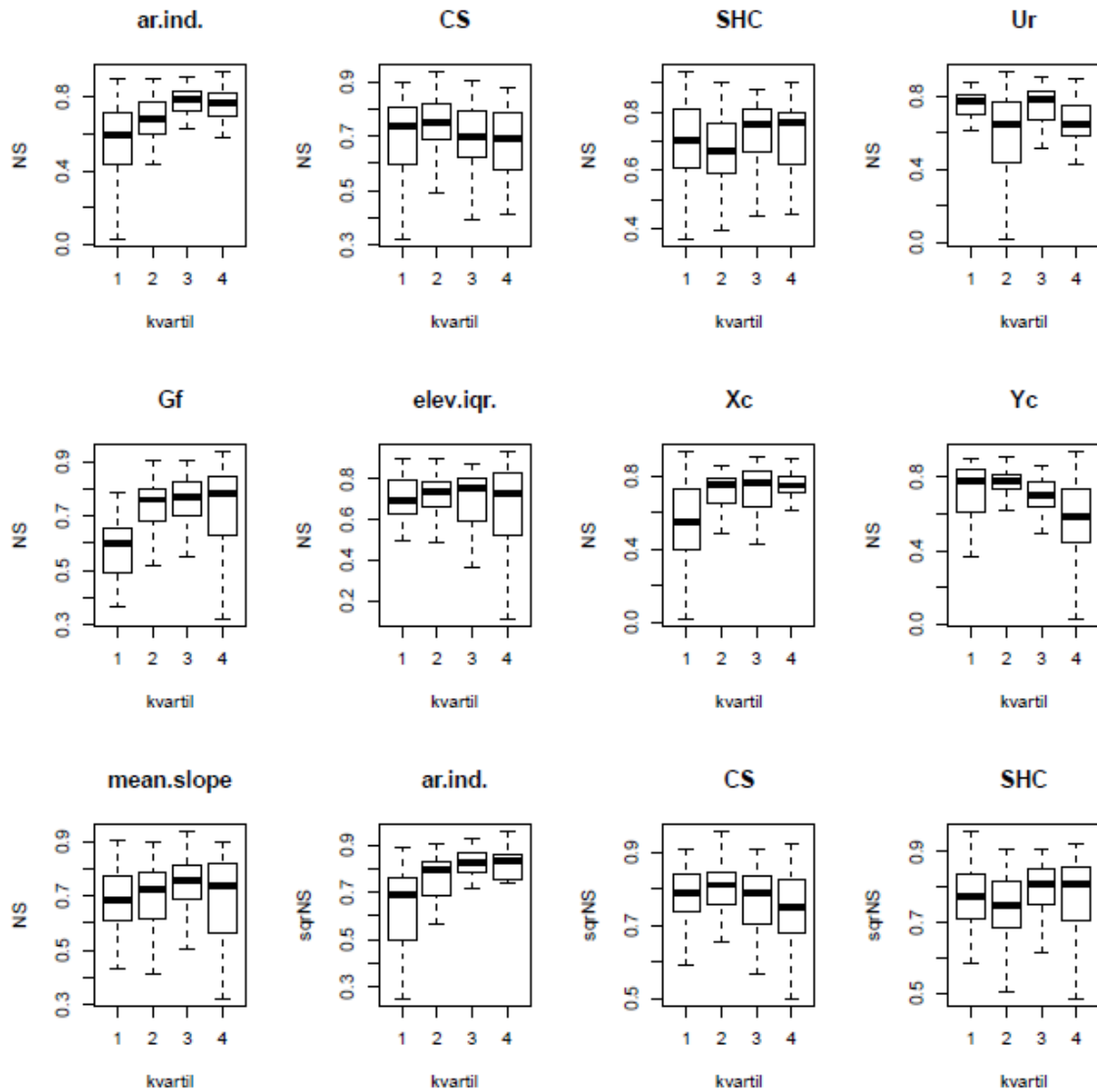
YU, P. S., LIU, C. L., LEE, T. Y. 1994: Application of transfer function model to a storage-runoff process. In Hipel K.W.: *Time Series Analysis in Hydrology and Environmental Engineering*. Kluwer academic Publisher, Dordrecht, s.87-97.

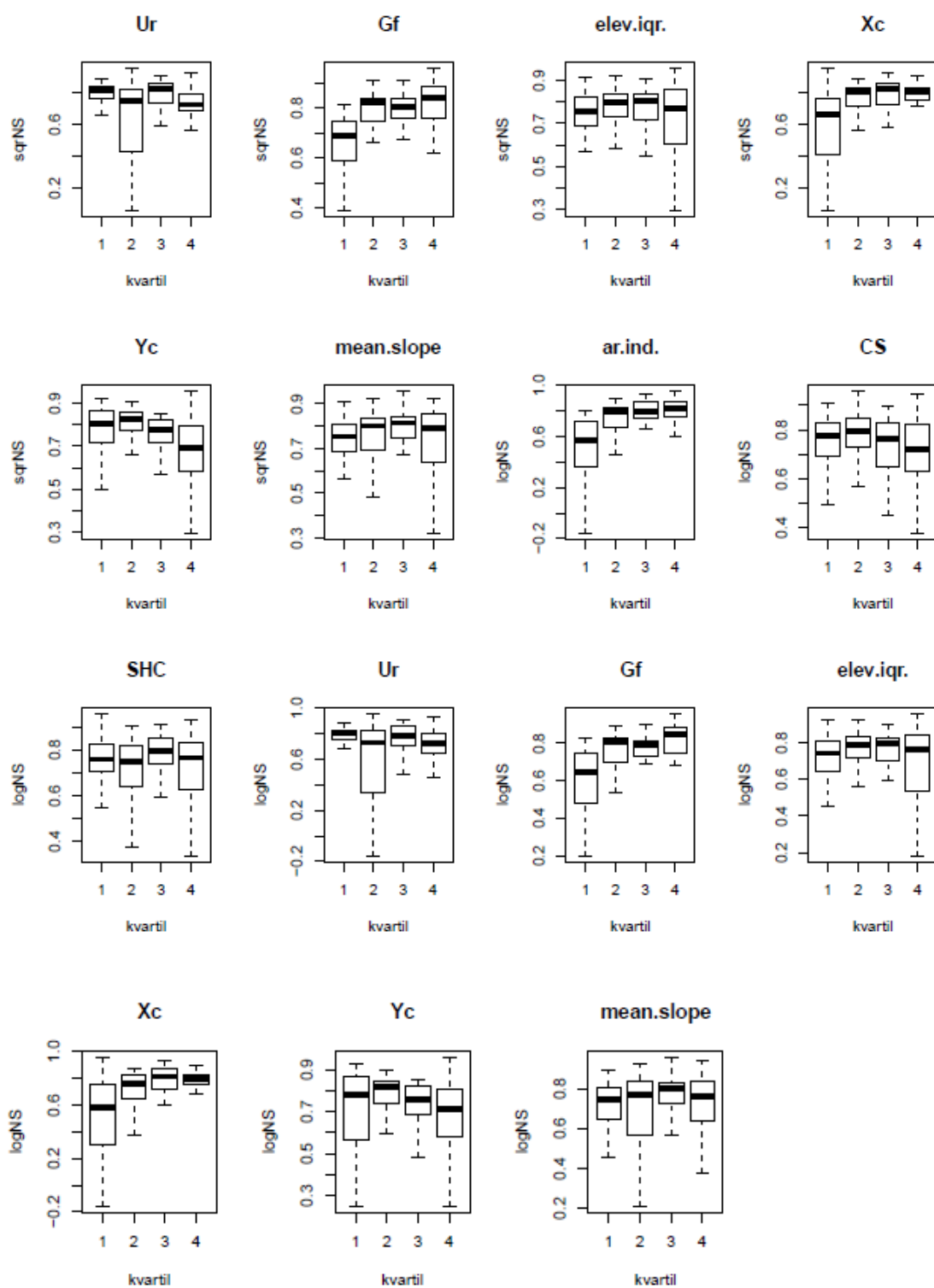
ZHANG Y., & CHIEW F. H. S., 2009: Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments, *Water Resour. Res.*, 45.

<https://ewater.atlassian.net/wiki/display/SD41/GR4J++SRG>, cit. 12. 4. 2016

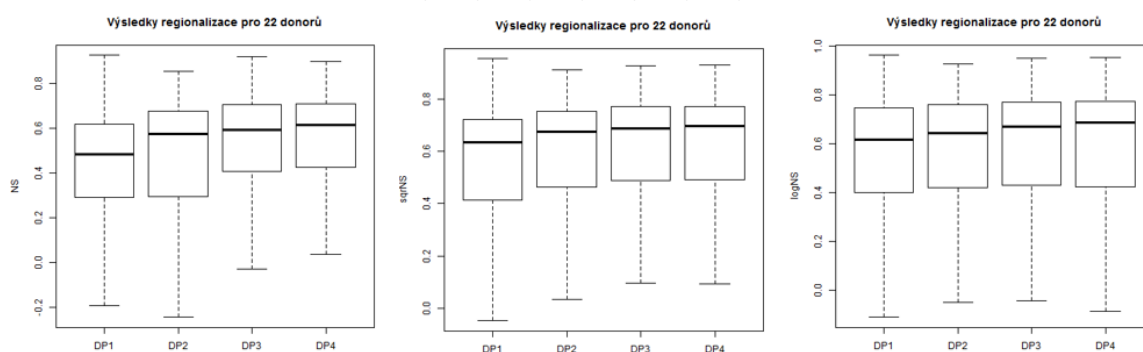
9 PŘÍLOHY

Příloha č. 1: Vztah mezi simulační účinností modelu GR4J vyjádřenou pomocí hodnotících kritérií NS, NSsqr a NSlog a charakteristikami povodí

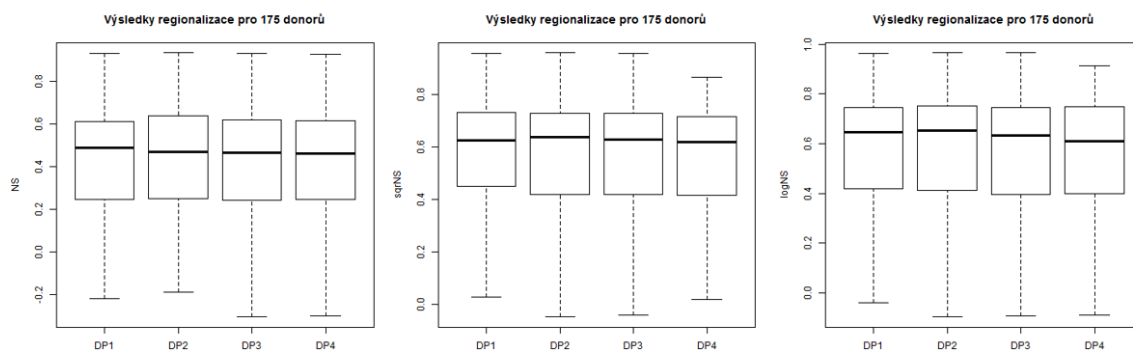




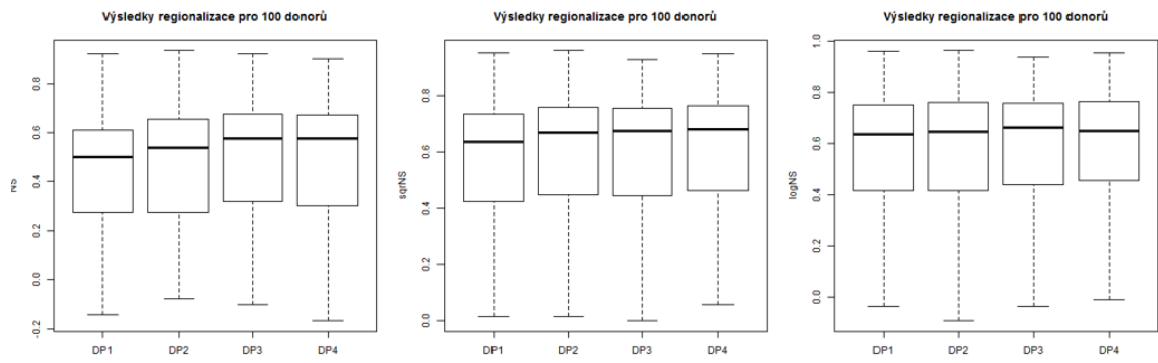
Příloha č. 2: Vliv identifikovaných optimálních kombinací na simulační účinnost modelu na nepozorovaných povodích hodnocených kritérii NS (vlevo), NSsqr (uprostřed) a NSlog (vpravo) pro zvolené počty donorů.



Obr. č. 10: Vliv identifikovaných optimálních kombinací pro přístup 22 donorů na simulační účinnost modelu na nepozorovaných povodích hodnocených kritérii NS (vlevo), NSsqr (uprostřed) a NSlog (vpravo).



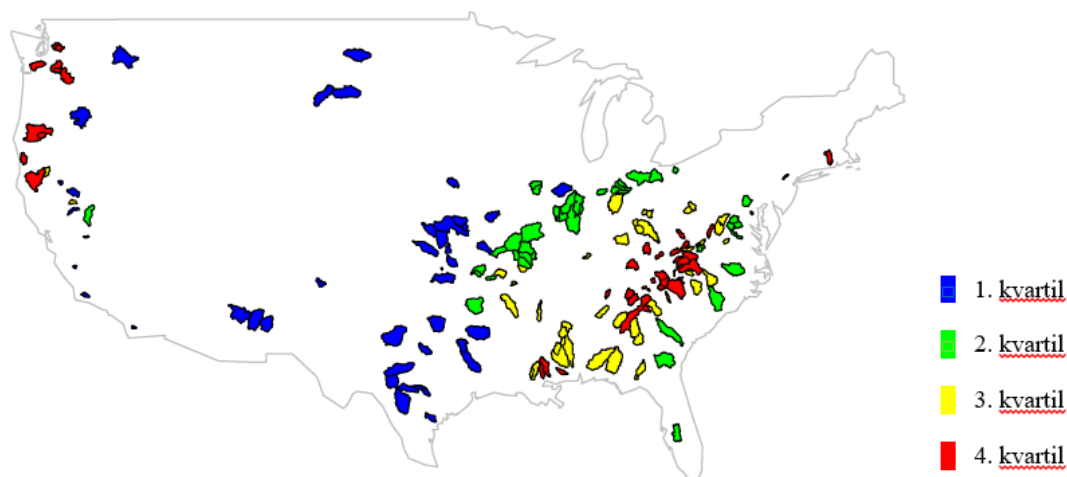
Obr. č. 11: Vliv identifikovaných optimálních kombinací pro přístup 100 donorů na simulační účinnost modelu na nepozorovaných povodích hodnocených kritérii NS (vlevo), NSsqr (uprostřed) a NSlog (vpravo).



Obr. č. 12: Vliv identifikovaných optimálních kombinací pro přístup 175 donorů na simulační účinnost modelu na nepozorovaných povodích hodnocených kritérii NS (vlevo), NSsqr (uprostřed) a NSlog (vpravo).

Příloha č. 3: Změna vybrané charakteristiky povodí napříč použitým souborem povodí v kontextu jejich geografické lokace na území USA

Obrázek č. 13: Změna indexu aridity napříč souborem povodí, kde v prvním kvartilu jsou nejvíce aridní povodí ($P/PE < 0,97$), v druhém kvartilu jsou semiaridní až semihumidní povodí (P/PE v intervalu $0,97$ až $1,21$), v třetím kvartilu jsou humidní povodí (P/PE v intervalu $1,21$ až $1,47$) a ve čtvrtém kvartilu jsou velmi humidní povodí ($P/PE > 1,47$).



Obrázek č. 14: Změna průměrné nadmořské výšky povodí napříč souborem povodí, kde v prvním kvartilu jsou povodí s mean.elev. < 207 m.n.m., v druhém kvartilu jsou povodí s mean.elev. v intervalu 207 až 313 m.n.m., v třetím kvartilu jsou povodí s mean.elev. v intervalu 313 až 675 m.n.m. a ve čtvrtém kvartilu jsou povodí s mean.elev. > 675 m.n.m.

