

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ  
KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A  
ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ



**Vliv výběru transformace časových řad odtoku na kalibraci modelu GR4J**

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

**Bakalant: Matěj Ruml**

2024

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

Fakulta životního prostředí

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Matěj Ruml

Vodní hospodářství

Název práce

**Vliv výběru transformace časových řad odtoku na kalibraci modelu GR4J**

Název anglicky

**Influence of the choice of runoff time series transformation on the calibration of the GR4J model**

---

## Cíle práce

Cílem práce je vyhodnotit, jaký vliv mají různé metody transformace časových řad odtoku na kalibraci modelu GR4J z hlediska z hlediska simulační účinnosti a optimálních hodnot parametrů modelu.

## Metodika

- 1) Rešerše problematiky zaměřená na hydrologické modelování se zaměřením na kalibraci modelu.
- 2) Návrh experimentu, popis vstupních dat, popis modelu GR4J.
- 3) Kalibrace modelu GR4J na základě různých transformací časových řad pozorovaného a simulovaného odtoku a vyhodnocení výsledků.
- 4) Diskuze prezentovaných výsledků.

**Doporučený rozsah práce**

30 – 50 stran

**Klíčová slova**

Srážko-odtokový model, kalibrace modelu, transformace časových řad, časové řady

---

**Doporučené zdroje informací**

BEVEN, K. J. *Rainfall-Runoff models : the primer*. New York: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 0-470-86671-3.

SINGH, Vijay P. *Computer models of watershed hydrology*. Colorado: Water Resources Publications, 2012. ISBN 978-188720174-2.

WAGENER, Thorsten; WHEATER, Howard.; GUPTA, Hoshin V. *Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments*. London: Distributed by World Scientific, 2004. ISBN 1860944663.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2023/24 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

Ing. Martin Heřmanovský, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2024

**prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2024

**prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 19. 03. 2024

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Vliv výběru transformace časových řad odtoku na kalibraci modelu GR4J vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů. Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o autorském právu, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s tištěnou verzí a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 28.3.2024

Podpis:.....

Matěj Ruml

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Martinu Heřmanovskému, Ph.D., za odborné vedení, vstřícný přístup, cenné rady a trpělivost při vytváření této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu v průběhu mého studia.

## Abstrakt

Cílem práce je vyhodnocení vlivu vybraných metod transformace časových řad simulovaného a pozorovaného odtoku využitých při výpočtu kritéria simulační účinnosti na kalibraci celistvého konceptuálního srážko-odtokového modelu GR4J na souboru povodí projektu MOPEX. Pro analýzu bylo použito 200 povodí z projektu MOPEX. V rámci případové studie byl použit srážko-odtokový model GR4J. Pro řešení případové studie byly použity tyto metody transformace časových řad: Box-Cox transformace, transformace druhou odmocninou, transformace setříděním, logaritmická transformace, transformace převrácenou hodnotou. Výsledky případové studie ukazují, že volba metody transformace časových řad pozorovaného a simulovaného odtoku při výpočtu kritéria simulační účinnosti NSE v rámci kalibračního procesu má vliv na výsledné hodnoty NSE a optimální hodnoty parametrů modelu GR4J.

**Klíčová slova:** Srážko-odtokový model, kalibrace modelu, transformace časových řad, časové řady

# Abstract

The aim of this bachelor thesis is to evaluate the influence of selected methods of transformation of simulated and observed runoff time series used in the calculation of the simulation efficiency criterion on the calibration of the GR4J full conceptual rainfall-runoff model on the MOPEX project catchment ensemble. 200 catchments from the MOPEX project were used for the analysis. The rainfall-runoff model GR4J was used in the case study. The following time series transformation methods were used to solve the case study: Box-Cox transformation, square root transformation, sorting transformation, logarithmic transformation, inverse transformation. The results of the case study show that the choice of the observed and simulated runoff time series transformation method in the calculation of the NSE simulation efficiency criterion in the calibration process has an impact on the resulting NSE values and the optimal values of the GR4J model parameters.

Keywords: Rainfall-runoff model, model calibration, time series transformations, time series

# Obsah

1 Úvod .....	10
1.1 Cíle Práce .....	11
2 Matematické modelování srážko-odtokového procesu .....	12
2.1 Historie srážko-odtokového modelování .....	13
2.2 Základ hydrologických modelů .....	14
2.3 Základní dělení hydrologických modelů .....	15
2.3.1 Rozdělení hydrologických modelů dle stupně kauzality .....	17
2.3.2 Rozdělení hydrologických modelů z hlediska prostorové diskretizace .....	20
2.3.3 Rozdělení dle časového měřítka .....	21
3 Kalibrace hydrologických modelů .....	22
3.1 Kalibrační metody .....	23
3.2 Objektivní funkce .....	25
3.3 Optimalizační algoritmy .....	26
3.4 Ukončovací kritéria .....	27
4 Metodika .....	28
4.1 Vstupní data .....	28
4.2 Model GR4J .....	29
4.3 Kalibrace modelu GR4J .....	31
4.4 Popis vybraných metod transformace .....	32
5 Výsledky .....	35
5.1 Výsledky kalibrace modelu GR4J .....	35
5.2 Porovnání hodnot parametrů modelu GR4J .....	38
6. Diskuse výsledků .....	43
7. Závěr .....	45



8. Seznam použité literatury .....	46
------------------------------------	----

# 1 Úvod

Hydrologie je multidisciplinární věda zabývající se studiem vody ve všech jejích formách. Hraje klíčovou roli v porozumění a řešení různých hydrologických jevů. Jedním z hlavních aspektů hydrologie je analýza odtoku v různých povodích, což představuje komplexní úkol spojený s modelováním srážko-odtokového procesu. Tento proces ovlivňuje nejen hydrologické jevy, jako jsou povodně a sucha, ale má také důležité dopady na životní prostředí a lidské životy.

V rámci analýzy hydrologických dat se často pracuje s časovými řadami, které zachycují vývoj odtoku nebo dalších hydrologických proměnných v průběhu času. Tyto časové řady jsou základem pro pochopení sezónních variací, dlouhodobých trendů a náhodných fluktuací v hydrologických jevech. Transformace časových řad odtoku je proto klíčovým prvkem při analýze hydrologických dat a kalibraci hydrologických modelů, správná volba transformace může výrazně ovlivnit interpretaci výsledků a přesnost modelů.

## 1.1 Cíle Práce

Cílem práce je vyhodnocení vlivu vybraných metod transformace časových řad simulovaného a pozorovaného odtoku využitých při výpočtu kritéria simulační účinnosti na kalibraci celistvého konceptuálního srážko-odtokového modelu GR4J na souboru povodí projektu MOPEX.

Dílčí cíle práce:

- 1) Rešerše problematiky spojená s matematickým modelováním srážko-odtokového procesu se zaměřením na kalibraci modelu.
- 2) Návrh experimentu, popis vstupních dat, popis modelu GR4J.
- 3) Kalibrace modelu GR4J založená na zvolených metodách transformace časových řad simulovaného a pozorovaného odtoku při výpočtu hodnotícího kritéria simulační účinnosti modelu
- 4) Diskuse prezentovaných výsledků.

## 2 Matematické modelování srážko-odtokového procesu

Matematický model srážko-odtokového procesu představuje zjednodušený kvantitativní vztah mezi vstupními a výstupními veličinami určitého hydrologického systému (Daňhelka a kol., 2002). Ten je definován jako systém převážně fyzikálních procesů, působící na vstupní proměnné, jež pak transformuje ve výstupní veličiny. V matematickém vyjádření jde tedy o algoritmus řešení soustavy rovnic, které popisují strukturu a chování systému (Clarke, 1973 v Fleming, 1979).

V rámci hydrologie představuje simulační model matematický nástroj, který se zaměřuje na reprezentaci a analýzu hydrologických systémů. Dooge (1973) zdůrazňuje význam lineárních systémů, které slouží jako základ pro modelování procesů jako jsou srážky, odtok a infiltrace. Dooge (1973) aplikuje matematické a statistické metody pro analýzu a předpověď chování hydrologických systémů, přičemž klade důraz na identifikaci charakteristik systému na základě spojitých i diskrétních dat.

Podle Adema (2005) modely reprezentují ideální logické struktury, které pomáhají vysvětlit hydrologické jevy. Dingman (2002) definuje model jako prostředek k zachycení části přirozeného nebo lidským zásahem ovlivněného světa. Matematické modely zahrnují soubor vztahů a logických operací, které převádějí vstupy na výstupy (Adem, 2005).

Burges (1986) upozorňuje, že není jednoznačně definován nejvhodnější model a volba modelu závisí na specifických požadavcích a účelech analýzy. Klemeš (1997) zdůrazňuje, že praxe hydrologického modelování může být omezena nadměrným zaměřením na matematické aspekty a nedostatkem skutečných znalostí.

Hydrologické modely jsou důležité pro širokou škálu aplikací, včetně plánování, rozvoje a řízení vodních zdrojů, predikci a návrh protipovodňových opatření a modelování propojených systémů zahrnujících například kvalitu vody, ekologii a klima.

Aplikace hydrologických modelů mají různé cíle v závislosti na problému, který je třeba zkoumat. Singh a Woolhiser (2002) mimo jiné shrnuli různé cíle hydrologického modelování:

- Extrapolace bodových měření v prostoru i čase.
- Zlepšení základního porozumění stávajícím hydrologickým systémům a posouzení dopadu enviromentálních změn na vodní zdroje.
- Vývoj nových modelů nebo zdokonalování starých modelů pro manažerská rozhodnutí týkající se současné a budoucí hydrologie povodí (např. správa vodních zdrojů, obnova mokřadů, hospodaření se závlahovou vodou, obnova průtoků v tocích, hodnocení kvality vody a předpovídání a řízení povodní).

## 2.1 Historie srážko-odtokového modelování

Vývoj hydrologických modelů lze sledovat od prvních záznamů o měření vodních stavů u hlavních toků v 19. století až po současné sofistikované matematické a počítačové modely. Perrault, Mariotte a Halley přispěli v 17. století k prvnímu kvantitativnímu vyčíslení hydrologických proměnných a položili základy moderní hydrologie (Wagener a kol., 2007). Dále byly v 19. století učiněny další pokroky, jako například Darcyho zákon a Dupuit-Thiemova rovnice, které popisují proudění vody v porézním médiu a proudění vody ke studni, a tyto principy byly rozšířeny a upraveny pro potřeby hydrologického modelování (Beven, 2001).

V průběhu 20. století došlo k významnému rozvoji hydrologických modelů, což bylo umožněno zejména pokrokem v počítačových technologiích, které umožnily složitější simulace a analýzy.

Folseův model z roku 1929 byl jedním z prvních, který se pokusil integrovat vybrané složky hydrologického cyklu. Shermanova teorie jednotkového hydrogramu z roku 1932 a následná Doogeova teorie lineární transformace povodňové vlny z roku 1959 představují základní kameny, na kterých byly postaveny pozdější modely. Hortonova rovnice infiltrace z roku 1939 a Philipovo rozšíření této rovnice v roce 1954 přinesly nový pohled na proudění v nenasyceném prostředí a poskytly základ pro další výzkum

v této oblasti (Dawdy a kol., 1972). SWM – Stanford Watershed Model, vyvinutý Crawfordem a Linsleyem v roce 1966, byl průkopnickým modelem, který integroval matematickou reprezentaci srážko-odtokových procesů a byl široce využíván pro studium transportu chemických látek v tocích (Crawford a Linsley, 1966).

Shermanův jednotkový hydrogram a Hortonova infiltrační teorie jsou příklady klíčových modelů, které jsou dodnes využívány pro modelování srážko-odtokového procesu (Dooge, 1973).

V České republice byl v roce 2001 zaveden významný milník v podobě hydrologických modelů v předpovědní službě, což vedlo k rozvoji předpovědních služeb a založení krajských poboček ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav) (ČHMÚ, 2001).

Tyto modely položily základy pro moderní hydrologické modelování a otevřely cestu pro vývoj složitějších a více integrovaných systémů, které jsou schopny simulovat širokou škálu hydrologických procesů s větší přesností a podrobností.

## **2.2 Základ hydrologických modelů**

V roce 1982 identifikovala Americká společnost inženýrů (ASCE) základní pojmy pro různé typy matematických modelů. Tyto pojmy zahrnují analytické, deterministické, dynamické, empirické, heuristické, interaktivní, lineární a nelineární, numerické, pravděpodobnostní (stochastické), semi-empirické, simulační a teoretické modely. Nicméně, v oblasti hydrologických modelů se obvykle setkáváme s čtyřmi základními kategoriemi, a to simulační základ, prostorové zobrazení, časové zobrazení a způsob řešení. Každá kategorie má své podkategorie. Simulační základ může být fyzikálně založený, koncepční, empirický nebo regresní, nebo stochastický. Prostorové zobrazení může být celistvé, distribuované nebo založené na souřadnicové soustavě. Časové zobrazení může být sezónní, epizodní a kontinuální. Způsob řešení může být nulový, formálně-analytický, formálně-numerický nebo hybridní. Tyto pojmy poskytují základ pro klasifikaci a definici hydrologických modelů (Dingman, 2002).

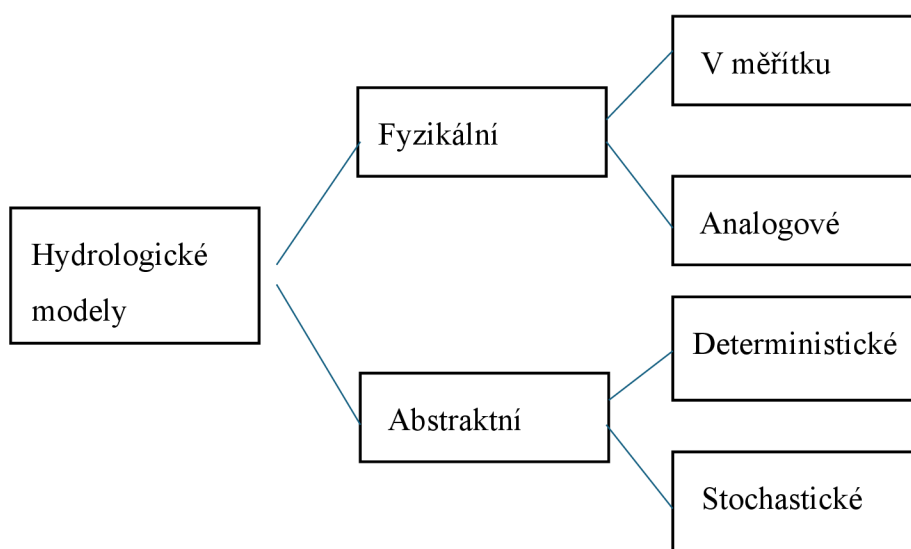
Je důležité klasifikovat hydrologické modely kvůli správnému porozumění jejich schopnostem a omezením. Gosain a spol. (2009) zdůrazňují, že při klasifikaci je důležité

vzít v úvahu umělé i společné charakteristiky modelů a přesně identifikovat jejich vlastnosti. Avšak, jak uvádí Wang a spol. (1996) a DHI (2004), klasifikace může být komplikovaná kvůli překrývání charakteristik mezi různými třídami modelů.

## 2.3 Základní dělení hydrologických modelů

Dingman (2002) rozdělil hydrologické modely dle charakteristik a použití do tří základních tříd, fyzikální, analogové a matematické modely.

Naproti tomu Chow a kol. (1988) uvádí, že analogové modely jsou spolu modely v měřítku podskupinou fyzikálních modelů. Dělení hydrologických modelů dle Chowa a kol. (1988) je uvedeno na obrázku č.1.



Obr. 1: Klasifikace hydrologických modelů podle Chowa a kol. (1988)

Fyzikální model je hmatatelná zkonstruovaná reprezentace části přírodního světa. Model je konstruován ve větším nebo menším měřítku než přirozený systém, formální pravidla škálování založená na rozměrové analýze, kterou představili King a kol. (1960) se používají k tomu, aby se pozorování na modelu vztahovala k reálnému světu. Fyzikální modely jsou důležitým prostředkem k pochopení problémů hydrauliky a mechaniky tekutin a často se používají při navrhování složitých inženýrských staveb, zejména těch, které zahrnují proudění v otevřených korytech. Hydrologové využívají

fyzikální modely k simulaci dvourozměrného proudění podzemní vody za různých okrajových podmínek. Fyzikální modely v měřítku 1:1 ve studiích na kropicích plochách byly použity k objasnění procesu infiltrace (Nassif a Wilson 1975) a fyzikální modely povodí v malém měřítku byly použity k objasnění některých charakteristik reakce povodí na srážky (Black 1970, 1975).

Analogové modely využívají pozorování jednoho procesu k simulaci fyzikálně analogického přírodního procesu. Dingman (2002) uvádí jako příklad tok elektrické energie daný Ohmovým zákonem, který je přesně analogický Darcyho zákonu proudění podzemní vody, takže distribuční design vodivého papíru lze použít k určení zákonitostí potenciálů podzemní vody (a tedy i proudění podzemní vody) za různých okrajových podmínek (Dingman, 2002).

Matematický model je explicitní sekvenční soubor numerických a logických kroků, který převádí numerické vstupy představující průtoky nebo stavy zásobníků na numerické výstupy představující jiné průtoky nebo stavy zásobníků. Základem matematického modelu jsou rovnice, jejichž formy představují kvalitativní chování modelu a parametry – numerické konstanty – v těchto rovnicích, které diktují kvantitativní chování. (Dingman, 2002)

S rychlým nárůstem dostupnosti výkonnějších digitálních počítačových modelovacích technik a softwaru bylo používání fyzikálních i analogových modelů v hydrologii do značné míry nahrazeno používáním počítačových matematických modelů, které jsou obvykle levnější a mnohem flexibilnější.



## 2.3.1 Rozdělení hydrologických modelů dle stupně kauzality

Jeníček (2005) uvádí, že toto rozdělení je v hydrologii jedno z nejpoužívanějších. Dále uvádí, že kauzalita je vyjádřena vztahem příčina – důsledek. Modely se tedy dle kauzality dělí na deterministické a stochastické.

### Stochastické modely

Stochastické modely využívají náhodné proměnné k reprezentaci nejistoty procesu a generují různé výsledky z jedné sady vstupních dat a hodnot parametrů, pokud běží za "zvenčí viditelných" stejných podmínek (Beven, 2001). Konkrétní sada vstupů vytvoří výstup podle statistického rozdělení. To připouští určitou nahodilost nebo nejistotu možného výsledku v důsledku nejistoty vstupních proměnných, okrajových podmínek nebo parametrů modelu (Pechlivanidis a kol., 2011).

Becker a Serban (1990) rozdělují stochastické modely takto:

- SP (Stochastické pravděpodobnostní) – U těchto modelů jsou jednotlivé hydrologické parametry jako například maximální či minimální průtok, vodní stavy nebo podzemní odtok charakterizovány určitým pravděpodobnostním rozdělením.
- ST (Stochastic Time series generation) - modely generování časových řad. Použití těchto modelů je možné při extrapolaci časových řad pozorovaných parametrů, přičemž se zachovávají jejich statistické charakteristiky.

### Deterministické modely

Jeníček (2005) rozděluje dále deterministické modely do tří kategorií:

- Deterministické fyzikální
- Deterministické konceptuální
- Deterministické empirické (Black-Box, metrické)

## Empirické modely (Metrické, Black-box)

Základní charakteristikou metrických modelů je, že vycházejí především z pozorování a snaží se charakterizovat odezvu systému na základě dostupných dat (Wheater a kol., 1993). Metrické přístupy jsou tedy v podstatě empirické; příkladem je teorie jednotkového hydrogramu (UH) pro simulaci v měřítku povodí na základě srážkových událostí, kterou vyvinul Sherman (1932). Jednoduchost takových modelů umožnila jejich poměrně snadnou aplikaci na neměřená povodí pomocí regionální analýzy, která vztahovala (parsimonní) vlastnosti modelu k fyzikálním a klimatickým deskriptorům povodí. Je však třeba poznamenat, že metrické modely jsou závislé na rozsahu dostupných údajů, a přestože byly použity k extrapolaci na extrémní události nebo neměřená povodí, výsledky obvykle postrádají formální specifikaci mezi spolehlivostí (Wheater, 2002).

## Konceptuální modely

Podle Wheatera a kol. (1993) jsou konceptuální modely založeny na dvou kritériích: za prvé, struktura modelu je specifikována před zahájením jakéhokoli modelování, a za druhé, ne všechny parametry modelu mají přímou fyzikální interpretaci (tj. nejsou nezávisle měřitelné). Proto musí být alespoň některé parametry konceptuálního modelu odhadnuty prostřednictvím kalibrace na základě pozorovaných údajů. Konceptní modely obecně reprezentují všechny složky hydrologického cyklu, které jsou považovány za důležité ve vstupně-výstupních vztazích v měřítku povodí (Wheater, 2002). Tento typ modelu se značně liší ve složitosti a struktura modelu bývá založena na rozsáhlém využití schematických zásobníků, které jsou kombinovány tak, aby představovaly konceptní pohled na důležité hydrologické prvky. Modely se mohou lišit složitostí od dvou nebo tří jednoduchých zásobníků až po velmi komplexní zobrazení. Wheater (2002) poznamenal, že "jednoduchá struktura modelu neodráží složitost srážko-odtokové odezvy a složitá struktura modelu není vždy podložena dostupnými daty. Pro úspěšnou identifikaci modelu je rozhodující rovnováha mezi složitostí modelu a dostupnými informacemi". Složitost modelu lze snížit na vhodnou míru pomocí identifikační statistiky (Dunn a kol., 2008) nebo analýzy citlivosti (Fenicia a kol., 2008; van Werkhoven a kol., 2009) a udržováním necitlivých parametrů na konstantní úrovni nebo formální přestavbou modelu (McIntyre a Al-Qurashi, 2009). Příkladem

konceptuálních modelů je model Stanford Watershed Model IV (SWM) vyvinutý Crawfordem a Linsleym v roce 1966.

### Fyzikální modely

Fyzikálně založené modely představují dílčí hydrologické procesy, jako je evapotranspirace, infiltrace, přetékaní a proudění v saturované a nenasycené zóně pomocí řídicích pohybových rovnic (obvykle formulovaných jako nelineární parciální diferenciální rovnice) na základě mechaniky kontinua. Obecně platí, že pohybové rovnice jednotlivých procesů jsou řešeny numericky pomocí metody konečných diferencí nebo prostorové diskretizací metodou konečných prvků; nicméně mohou existovat analytická řešení (Wheater a kol, 1993). Teoreticky jsou modely založené na fyzice definovány plně měřitelnými parametry a mohou poskytovat nepřetržité simulace celkového odtoku z povodí bez kalibrace (Beven, 2001).

Fyzika za strukturou modelu je obecně založena na laboratorních nebo malých polních experimentech, a proto je ovlivněna povahou samotných experimentů (Pechlivanidis a kol., 2011). Extrapolace na větší měřítku (např. povodí) často zahrnuje předpoklad, že fyzikální procesy a vlastnosti jsou nezávislé na měřítku, což vyvolává nejistotu ohledně jejich použitelnosti (Beven, 2004). Ke snížení výpočetní zátěže a požadavků na data se někdy k reprezentaci fyziky používá zjednodušená fyzika/mechanika (např. zjednodušené St. Venantovy rovnice, rovnice Green-Ampta (Green a Ampt (1911) v Mein a Larson, 1973), což vede k odchylce od fyzikálního základu.

Parametry fyzikálních modelů jsou v zásadě měřitelné, ale v praxi toho nelze dosáhnout, protože taková měření se v podstatě provádějí pouze bodově (Wheater, 2002). Proto tyto modely používají zprůměrované proměnné a parametry v měřítku mřížky, které jsou větší než měřítko procesů. Hodnoty vlastností v místním měřítku lze odhadnout (obecné popisy půd, jako je databáze NSRI (Hallett a kol., 2006) anebo prostřednictvím kalibračního postupu), ale nejistoty jsou dostatečně velké, aby mohly zahrnovat širokou škálu odezev procesu (Stephenson a Freeze, 1974).

## **2.3.2 Rozdělení hydrologických modelů z hlediska prostorové diskretizace**

V zásadě se rozlišují na dvě kategorie, modely distribuované a modely celistvé (lumped). Vznikla také kategorie semi-distribuovaných modelů.

Celistvé modely považují povodí za jednu jednotku se stavovými proměnnými, které představují průměry pro celé povodí (Beven, 2001). Obecně je celistvý model vyjádřen diferenciálními nebo empirickými algebraickými rovnicemi a nebere v úvahu prostorovou variabilitu procesů, vstupů, okrajových podmínek a geometrických charakteristik systému (povodí) (Singh, 1995). Distribuované modely vytvářejí předpovědi, které jsou rozloženy v prostoru, se stavovými proměnnými, které představují místní průměry, diskretizací povodí na řadu prvků (nebo čtverců sítě) a řešením rovnic pro stavové proměnné spojené s každým prvkem (Singh a Frevert, 2006). Distribuované modely jsou tedy schopny do určité míry zohlednit prostorovou variabilitu procesů, vstupů, okrajových podmínek a charakteristik povodí (Pechlivanidis a kol., 2011).

Všechny distribuované modely však používají průměrné proměnné a parametry v měřítku prvku nebo sítě a často jsou parametry zprůměrovány pro mnoho čtverců sítě, zejména kvůli dostupnosti dat (Beven, 2001).

Semi-distribuované modely kombinují výhody obou typů prostorové reprezentace. Tento typ modelu nepředstírá, že reprezentuje prostorově spojitě rozložené stavové proměnné; spíše diskretizuje povodí do míry, kterou modelář považuje za užitečnou při použití souboru celistvých modelů. (Pechlivanidis a kol., 2011).

Semi-distribuovaný model tak může reprezentovat důležité vlastnosti povodí a zároveň vyžaduje méně dat a nižší výpočetní náklady než distribuované modely (Orellana a kol., 2008).

### 2.3.3 Rozdělení dle časového měřítka

Míra časové diskretizace je většinou určována podle způsobu použití modelu. (Jeníček, 2005).

Pro modelování povodňových situací, modelování znečištění nebo transportu splavenin či plavenin a operativní předpovědi, se běžně užívá hodinový až denní krok, pro bilanční modely může být délka výpočtového kroku i vyšší (týden, měsíc). Je třeba zdůraznit, že i jednotlivé časové proměnné mohou mít různý časový krok, stejně tak nemusí být stejný ani časový krok týž vstupních a výstupních veličin (Daňhelka a kol.,2002). Jiné rozdělení vychází z časové kontinuity výpočtu. Rozlišeny jsou modely kontinuální (simulují delší i víceleté období) a epizodní (simulace probíhá jen pro dílčí události – povodně nebo hydrologické sucho). Kontinuální modely jsou většinou používány na velkých územích, kde jsou povodně častěji způsobeny regionálními dešti, epizodní modely mají naproti tomu větší uplatnění při simulaci přívalových srážek postihující menší povodí (Jeníček, 2005).

### 3 Kalibrace hydrologických modelů

Kalibrace modelu je proces výběru vhodných hodnot parametrů modelu tak, aby bylo možné podrobně simulovat hydrologické chování povodí (Wagener a kol., 2004; Moore a Doherty, 2005). Ve většině modelů existují dva typy parametrů modelu: fyzikální parametry a procesní parametry (Sorooshian a Gupta, 1995). Fyzikální parametry představují fyzikální vlastnosti povodí a jsou obvykle měřitelné, jako je plocha povodí, sklon povrchu atd. Procesní parametry představují charakteristiky povodí, které nelze běžně měřit, jako je kapacita zásobníků  $v$ , koeficient nelinearity řídící odtok ze zásobníku  $v$  modelu atd. (Sorooshian a Gupta, 1995). Existují některé fyzikální parametry, jako je hydraulická vodivost a pórovitost, které jsou měřitelné teoreticky, ale obtížně měřitelné v praxi, a proto jsou často kalibrovány. Proces kalibrace může být manuální nebo automatický; v praxi však často jde o kombinaci obou (Pechlivanidis a kol., 2011).

Fyzikálně interpretovatelné parametry v těchto modelech mohou významně ovlivnit předpověď více než jednoho hydrologického procesu, protože tyto procesy jsou vzájemně propojeny. Při kalibraci parametrů modelu se běžně používá průtok jako kalibrační proměnná pro optimalizaci hodnot parametrů. Kalibrační proces se však zaměřuje spíše na zlepšení výkonnostních ukazatelů než na zlepšení reprezentace procesů v těchto modelech (Rajat a Athira. 2021). White a Chaubey (2005) uvádějí, že kalibrační proces s jedinou hydrologickou proměnnou nemusí zajistit správnou simulaci ostatních povrchových a podpovrchových hydrologických toků. Zlepšená reprezentace procesů v těchto modelech zvyšuje jejich vypovídací schopnost. Prediktivní sílu těchto modelů lze zlepšit omezením architektury modelu, omezením parametrizace modelu, omezením cílů modelu a předchozích znalostí modelu (Hrachowitz a kol., 2014). Existují studie, které doporučují používat měkká data pro kalibraci distribuovaných hydrologických modelů (Seibert, 1997; Seibert a McDonnell, 2002, 2015). Měkkými údaji nemusí být naměřené informace z terénu; mohou to však být informace o jednotlivých procesech, průměrný roční odhad nebo kvalitativní poznatky z experimentu. Použití měkkých dat a měřených hydrologických veličin společně pro kalibraci zlepšuje reprezentaci procesu v modelu. Hrachowitz a kol. (2014) použili ke

kalibraci různé hydrologické charakteristiky a expertní znalosti o povodí a výrazně tím zlepšili dynamiku procesu a predikční výkonnost modelu. Předpokladem tohoto přístupu jsou však předchozí znalosti o povodí.

Řídící rovnicí pro většinu modelů založených na procesech je rovnice vodní bilance. Proto je vlhkost půdy důležitou proměnnou, která ovlivňuje vodní a energetickou bilanci modelu (Brocca a kol., 2012). Přesná inicializace a modelování půdní vlhkosti jsou nezbytné pro simulaci průtoku, evapotranspirace, perkolace atd. (Rajib a kol., 2016). Nejistoty ve vstupních datech, struktuře modelu a parametrech však omezují přesnou predikci půdní vlhkosti v modelu povodí. Nejběžnějším přístupem, který se používá ke zlepšení odhadu půdní vlhkosti v hydrologickém modelu, je integrace naměřených údajů o půdní vlhkosti do procesu modelování prostřednictvím kalibrace nebo asimilace. Studie hydrologického modelování široce využívají údaje o půdní vlhkosti založené na dálkovém průzkumu Země z důvodu nedostatku měření půdní vlhkosti. (Kundu a kol., 2017).

### **3.1 Kalibrační metody**

Existují tři základní metody kalibrace hydrologických modelů (Pechlivanidis a kol., 2011):

Manuální kalibrace:

Jedná se o proces, který závisí především na modelujícím, který „ručně“ upravuje hodnoty parametrů modelu, dokud výstup modelu těsně neodpovídá pozorovaným datům. Úpravu hodnot parametrů provádí modelující metodou pokus-omyl, takže obeznámenost se strukturou modelu a povodím šetří čas a námahu. Obecně je obtížné určit „nejlepší shodu“ nebo určit jasný bod označující konec kalibračního procesu, a proto různí modeláři získají různé výsledky (Wheater, 2002). Časová náročnost představuje další výzvu při kalibraci tohoto typu. Celý proces nenabízí žádné nebo jen omezené informace z předchozích úprav parametrů, a formální analýza nejistoty je obtížná, ba dokonce v některých případech nemožná (Sorooshian a Gupta, 1995).

Automatická kalibrace:

Vývoj počítačových metod pro automatickou kalibraci hydrologických modelů byl částečně motivován potřebou urychlit (z hlediska výpočetní účinnosti) proces kalibrace. Dalším cílem bylo vyvinout objektivní strategii pro odhad parametrů, která zajistí konzistentní výkon eliminací subjektivního lidského úsudku, který je součástí manuálního přístupu (Boyle a kol., 2000). Automatický proces může poskytnout více objektivitu a snížit potřebu odborných znalostí s konkrétním modelem (Sorooshian a Gupta, 1995). Automatické kalibrační metody však ještě nedospěly do té míry, aby mohly zcela nahradit manuální metody kvůli obtížnosti konstrukce objektivních funkcí a optimalizačních algoritmů, které replikují lidský úsudek; a proto je automatická kalibrace často nejúspěšnější při použití ve spojení s manuálním postupem (Pechlivanidis a kol., 2011).

Podle Sorooshiana a Gupty (1995) se typický automatický postup odhadu parametrů skládá ze čtyř hlavních prvků: zvolené cílové funkce (nebo míry výkonu), optimalizačního algoritmu, ukončovacích kritérií a kalibračních dat. Autoři uvedli, že účelem automatické kalibrace je najít ty hodnoty parametrů modelu, které optimalizují (minimalizují nebo maximalizují, podle potřeby) číselnou hodnotu objektivní funkce.

Kombinace dvou předchozích metod:

Tento přístup spojuje ruční nastavení parametrů s následnou automatickou kalibrací. Kromě těchto metod existují i další přístupy, jako je použití víceúčelové funkce. V tomto případě se využívají klasický a Paretův přístup. Klasický přístup kombinuje více objektivních funkcí s různými vahami podle požadavků uživatele. Naopak, Paretův přístup hledá soubor hodnot parametrů, které dosáhnou globálního optima s ohledem na více cílů (Lohani, 2018).



## 3.2 Objektívni funkce

Objektívni funkce je numerická míra rozdílu mezi modelem simulovaným výstupem a pozorovaným (naměřeným) výstupem povodí (Schaefli a Gupta, 2007).

Na základě statistické regrese a teorie přizpůsobení modelu byla nejběžněji používanou cílovou funkcí některá z funkcí vážených nejmenších čtverců (WLS) (Croke, 2007). Objektívni funkce může zahrnovat váhové parametry, které indikují důležitost, kterou je třeba přikládat přizpůsobení konkrétních charakteristik hydrogramu. Mimo jiné Croke (2007) a Koren a kol. (2008) navrhli, že zahrnutí dalších zdrojů dat, jako jsou údaje o vlhkosti půdy a hladině podzemní vody, může zlepšit konzistenci a stabilitu odhadů parametrů.

Často využívanou objektívni funkcí v hydrologickém modelování je Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE kritérium (Nash a Sutcliffe, 1970). Studie ukazují, že NSE je schopno zachytit dobu do kulminace a lineární korelaci s pozorovaným průtokem a zároveň podceňuje variabilitu a střední hodnotu (Schaefli a Gupta, 2007; Gupta a kol., 2009, Pechlivanidis a kol., 2010a). K překonání některých omezení NSE byla navržena objektívni funkce s názvem Kling and Gupta Efficiency, KGE (Gupta a kol., 2009). V několika dosavadních studiích se ukazuje že KGE je schopno dobře porovnat variabilitu, kulminace a střední hodnotu průtoků, přičemž udržuje vysokou lineární korelaci mezi modelovanými a pozorovanými daty (Pechlivanidis a kol., 2010a).

Sorooshian a Dracup (1980) vyvinuli objektívni funkci založenou na maximální věrohodnosti, aby důsledněji vysvětlili přítomnost buď autokorelace (nezávislost) nebo heteroskedasticity (měnící se rozptyl) chyb časových řad průtoků. Obecně však tento typ formální věrohodnostní funkce není v hydrologii upřednostňován, protože implicitní předpoklady o datech a modelových chybách nejsou ospravedlnitelné, s výjimkou studií používajících syntetické soubory dat (Beven, 2001). Obecně jsou preferovány jiné funkce, které jsou pro hydrology intuitivnější, jako je NSE nebo KGE.

### 3.3 Optimalizační algoritmy

Prostor popsany objektivní funkcí v prostoru parametrů se nazývá odezvodý povrch. Optimalizační algoritmus hledá v odezvodém povrchu hodnoty parametrů, které optimalizují (minimalizují nebo maximalizují) číselnou hodnotu objektivní funkce, omezenou na předem definované povolené rozsahy parametrů. Většinu optimalizačních metod nebo strategií lze klasifikovat buď jako metody lokálního vyhledávání, nebo jako metody globálního vyhledávání (Pechlivanidis a kol., 2011). Autoři dále uvádějí, že metody místního vyhledávání jsou navrženy tak, aby efektivně nacházely místní minimum (nebo maximum) v odpovídajícím prostoru. Tyto typy metod se snaží kontinuálně postupovat ve směru zlepšování funkční hodnoty, aby nakonec dospěly k místu funkčního optima, bez ohledu na to, kde v prostoru parametrů vyhledávací procedura začala (Sorooshian a Gupta, 1995). Postup zahrnuje tři hlavní kroky: výběr směru pohybu v parametrickém prostoru, rozhodnutí, jak daleko se v tomto směru posunout, a rozhodnutí o čase ukončení, když se další zlepšení nepovažuje za možné. Metody místního vyhledávání lze klasifikovat jako metody přímého vyhledávání a gradientové metody.

Při použití lokálního vyhledávání předpokládáme, že řešení existuje v prvním bodě odezvodého povrchu, kde se zjistí, že sklon je nulový v rámci určité stanovené tolerance, čímž se minimalizuje (nebo maximalizuje) hodnota objektivní funkce. Avšak vzhledem k tomu, že může existovat více bodů se sklonem blízkým nule, není to obvykle samo o sobě dostatečné kritérium. Globální vyhledávací metody prozkoumají celou možnou oblast parametrického prostoru ve snaze najít dno nejhlubšího údolí. Tento typ metody obecně zahrnuje vyhodnocení objektivní funkce na náhodném vzorku bodů v prostoru proveditelných parametrů s následnou manipulací se vzorkem pomocí kombinace deterministických a pravděpodobnostních pravidel (Jackson, 2007).

V hydrologickém modelování se široce používají metody náhodného vyhledávání. Soubory náhodných hodnot jsou generovány ze specifikovaného rozdělení parametrů modelu, které jsou následně dosazeny do modelových rovnic, aby se získaly odpovídající soubory výstupů (Pechlivanidis a kol., 2011). Při absenci předchozích informací o společných pravděpodobnostech specifikované rozdělení běžně předpokládá, že parametry jsou nezávislé (Beven, 2009). Evoluční a genetické algoritmy, jako je Multi-Objective Complex Evolution (MOCOM) (Yapo a kol., 1998),

Shuffled Complex Evolution (SCE) (Duan a kol., 1993), Multi- Objective Shuffled Complex Evolution Metropolis (MOSCEM-UA) (Vrugt a kol., 2003), AMALGAM (Vrugt a kol., 2008a) a DREAM (Vrugt a kol., 2008b) byly také použity v hydrologických aplikacích.

### **3.4 Ukončovací kritéria**

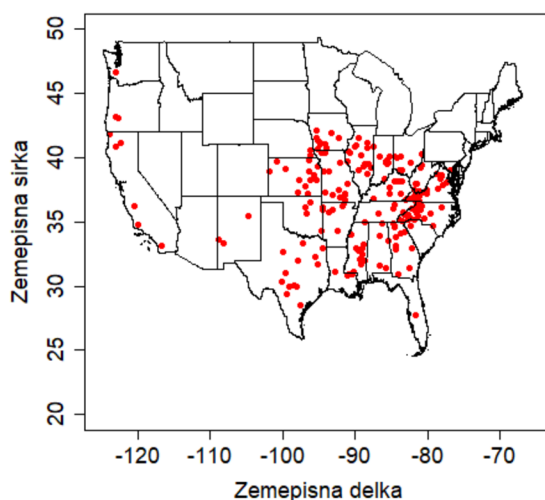
Existují tři hlavní způsoby, jak ukončit prohledávání parametrického prostoru: konvergence cílových funkcí, konvergence parametrů a maximální počet iterací. Na základě kritéria konvergence cílové funkce jsou iterace ukončeny, když nelze hodnotu cílové funkce dále výrazně zlepšit. Konvergence parametrů se používá k zastavení vyhledávání, když algoritmus není schopen výrazně zlepšit hodnoty parametrů, a proto nemůže zlepšit cílovou funkci během jedné nebo více dalších iterací. Kritérium maximálního počtu opakování se používá jako záloha, aby se zabránilo plýtvání časem a výkonu počítače, a to stanovením maximálního počtu iterací (Pechlivanidis a kol., 2011).

## 4 Metodika

V rámci bakalářské práce byla provedena případová studie, která zkoumala dopad výběru transformace časových řad odtoku při výpočtu kritéria simulační účinnosti na kalibraci modelu GR4J. Tato studie byla realizována na datasetu povodí z projektu MOPEX a v této části práce jsou podrobně popsána použitá vstupní data, použitý model, tak i zvolené metody transformace časových řad odtoku.

### 4.1 Vstupní data

K analýze byl využit soubor 200 povodí z projektu MOPEX (Model Parameter Estimation Experiment) (Duan a spol., 2006), které nebyly ovlivněny sněhovým režimem a nacházely se v USA (viz obrázek č. 2). Pro studii byly použity datové soubory obsahující třináctileté časové řady pro kalibraci modelu od 1. 1. 1955 do 31. 12. 1967 (s jednoletou „warming-up“ periodou od 1. 1. 1954 do 31. 12. 1954). Pro každé povodí byly získány časové řady průměrných denních srážkových úhrnů  $P$  [mm/den], potenciální evapotranspirace  $PE$  [mm/den] a pozorovaného odtoku [mm/den]. Celková délka časových řad činila 14 let (1. 1. 1954 až 31. 12. 1967). Časové řady  $PE$  byly vypočteny metodou dle Oudina a kol. (2005) na základě průměrné denní teploty a zeměpisné šířky povodí.

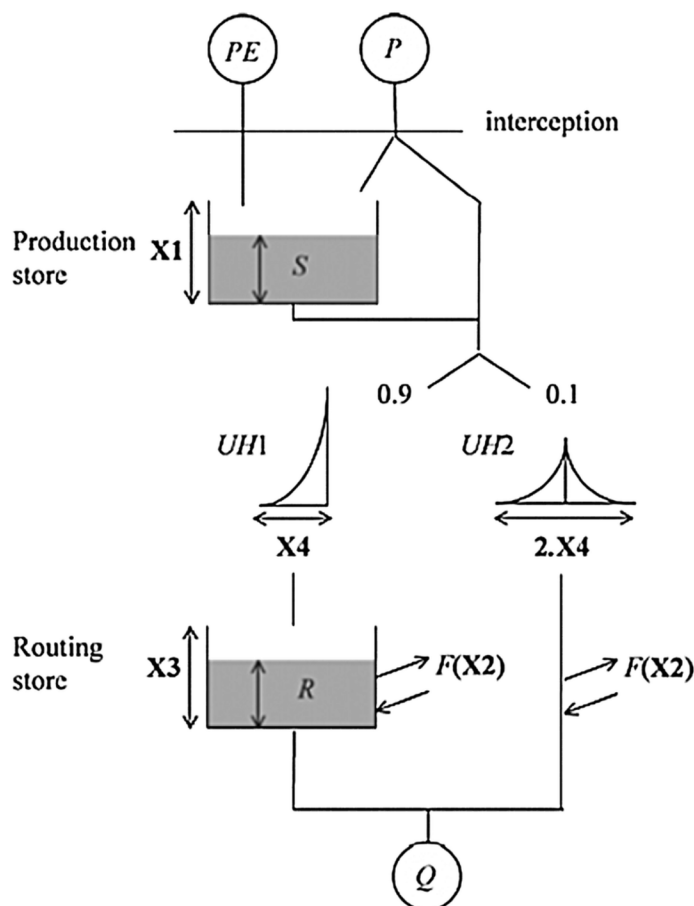


Obrázek č. 2: Soubor 200 povodí z projektu MOPEX na mapě USA

## 4.2 Model GR4J

Pro zpracování problematiky řešené v této bakalářské práci byl použit srážko-odtokový model GR4J. Model GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier), který představili Perrin a kol. (2003), je celistvý konceptuální srážko-odtokový model operující v denním časovém kroku. Model GR4J je modifikovanou verzí tří-parametrového modelu GR3J, který byl poprvé představen koncem 80. let 20. století. Původní model GR3J vytvořili Edijatno a Michel (1989).

Struktura modelu (viz obrázek č. 3) je založena na dvou zásobnících (produkční a transformační), jednotkovém hydrogramu a obsahuje 4 kalibrované parametry:  $X_1$  [mm] - maximální kapacita produkčního zásobníku,  $X_2$  [-] - maximální výměnný koeficient povodí,  $X_3$  [mm] - maximální kapacita transformačního zásobníku a  $X_4$  [den] - časový parametr jednotkového hydrogramu. Vstupem do modelu jsou časové řady srážek  $P$  [mm/den], potenciální evapotranspirace  $PET$  [mm/den] a výstupem je časová řada simulovaného odtoku  $R$  [mm/den].



Obr. 3: Schematický diagram modelu GR4J (Perrin a kol., 2003).

Výpočet celkového simulovaného odtoku lze shrnout do následujících kroků:

- 1) výpočet efektivní srážky na základě intercepčního zásobníku s nulovou kapacitou a produkčního zásobníku,
- 2) rozdělení efektivní srážky do dvou komponent (90 % rychlá odezva povodí, 10 % pomalá odezva povodí) a jejich transformace pomocí pouze jednotkového hydrogramu (pomalá odezva), nebo jednotkového hydrogramu a nelineárního transformačního zásobníku (rychlá odezva),
- 3) korekce na základě maximálního výměnného koeficientu povodí (v případě rychlé odezvy řešena jako součást bilance v nelineárním transformačním zásobníku),
- 4) výpočet celkového odtoku z povodí.

## 4.3 Kalibrace modelu GR4J

Model GR4J byl kalibrován na časové řadě 1. 1. 1955 do 31. 12. 1967. Model GR4J byl kalibrován na základě kritéria NSE.

Kritérium NSE nabývá hodnot od  $-\infty$  do 1, přičemž k nejlepší shodě mezi pozorovaným a simulovaným odtokem dochází při  $NSE = 1$ . Slovní hodnocení simulační účinnosti modelu lze provést na základě tab. č. 1.

Hodnocení výkonosti:	Hodnota NSE
Velmi dobré	$0,75 < NSE < 1,00$
Dobré	$0,65 < NSE < 0,75$
Dostačující	$0,50 < NSE < 0,65$
Nedostačující	$NSE \leq 0,50$

Tabulka č. 1: Přehled hodnocení kritéria NSE (Lufi a kol., 2020).

Při kalibraci modelu GR4J byl využit optimalizační algoritmus navržený Michelelem (1991), který kombinuje globální a lokální přístup.

Nejprve se provede prověření pomocí hrubé předem definované mřížky nebo seznamu sad parametrů. Poté se využije algoritmus lokálního prohledávání s nejstrmějším sestupem, přičemž se vychází z výsledku screeningu.

Screening se provádí buď na základě hrubé předem definované mřížky (s ohledem na různé počáteční hodnoty každého parametru), nebo ze seznamu počátečních sad parametrů. Nejlepší sada identifikovaná v tomto screeningu se pak použije jako výchozí bod pro algoritmus nejstrmějšího sestupného lokálního prohledávání. V rámci tohoto prohledávání rozsahy hodnot parametrů mohou být značně odlišné. Na parametry se aplikují jednoduché matematické transformace, aby se měnily v podobném rozsahu a získaly podobnou citlivost na předem definovaný krok hledání. Kalibrační algoritmus se zastaví, když se krok hledání zmenší pod předem definovanou mez.

## 4.4 Popis vybraných metod transformace

V rámci případové studie byly zvoleny a použity tyto metody transformace dat: transformace druhou odmocninou, logaritmická transformace, Box-Cox transformace, transformace převrácenou hodnotou a transformace seříděním.

Transformace druhou odmocninou je matematická metoda, která se používá k transformaci dat s cílem zmírnit jejich zkreslení a snížit jejich rozptyl. Transformace druhou odmocninou tohoto datasetu spočívá v aplikaci druhé odmocniny na každou jednotlivou hodnotu, což vede k novým hodnotám:

$$y_i = \sqrt{x_i} \quad (1)$$

kde je  $x_i$  je hodnota  $i$ -té proměnné a  $y_i$  je transformovaná hodnota  $i$ -té proměnné.

Tato transformace je vhodná pro data, která mají exponenciální rozdělení nebo mají velký rozptyl. Použití odmocninové transformace může vést k vyhlazení rozdělení dat a snížení jejich rozptylu. Použití transformace druhé odmocniny se doporučuje pouze pro data, která mají nezáporné hodnoty, protože odmocnina záporných čísel není definovaná v reálných číslech. Také je důležité upozornit, že odmocninová transformace může být citlivá na extrémní hodnoty v datech.

Logaritmická transformace je matematická operace, jejíž cíl je vyrovnat rozptyl dat a zmírnit zkreslení k vyšším hodnotám. Tato transformace použije dekadický logaritmus na každou hodnotu v datasetu. Patří mezi nelineární transformace stejně jako odmocninová transformace:

$$y_i = \log_c x_i \quad (2)$$

kde  $x_i$  je hodnota  $i$ -té proměnné,  $y_i$  je transformovaná hodnota  $i$ -té proměnné a  $\log_c$  je logaritmus o základu  $c$ , přičemž se zpravidla používá dekadický logaritmus ( $c = 10$ ).



Logaritmická transformace se často používá z několika různých důvodů. Jedním z nich je normalizace dat, což znamená převedení dat na normální rozdělení, zejména u proměnných s log-normálním rozdělením. Tím se usnadňuje práce s daty a aplikace statistických metod, které předpokládají normalitu. Dalším důvodem je dosažení homogenity rozptylu. Logaritmická transformace může pomoci k vyrovnání rozptylu dat napříč různými skupinami nebo kategoriemi, což je užitečné pro některé statistické analýzy.

Logaritmická transformace se dá použít pouze pro data s kladnými hodnotami, protože logaritmus nuly nebo záporných čísel není definován. V případové studii byl použit parametr Epsilon, který přičítá se k časovým řadám pozorovaných a simulovaných proměnných v každém časovém kroku před použitím transformace. Doporučení pro volbu hodnoty epsilon je obvykle jedna setina průměrného průtoku (Pushpalatha a kol. (2012)).

Box-Coxova transformace je metoda transformace nenormálních závislých proměnných do normálního tvaru. Tato transformace pomáhá stabilizovat rozptyl a může zlepšit přesnost všech následných statistických testů nebo modelů. Transformace je pojmenována po statistících Georgi Boxovi a Davidu Coxovi, kteří tuto techniku vyvinuli v 60. letech 20. století. Spočívá v tom, že se vezme přirozený logaritmus proměnné a pak se zvýší na určitou mocninu ( $\lambda$ ), která se určí odhadem maximální věrohodnosti. Hodnota  $\lambda$  závisí na tom, jak jsou data zkreslená. Pro potřeby experimentu byla zvolena  $\lambda = 2,5$ .

Boxova-Coxova transformace proměnné  $x$  se rovněž indexuje  $\lambda$  a je definována takto:

$$y_i = \frac{x^\lambda - 1}{\lambda} \quad (3)$$

kde, kde  $x_i$  je hodnota  $i$ -té proměnné a  $y_i$  je transformovaná hodnota  $i$ -té proměnné.

Pomocí transformace setříděním se data seřadí data vzestupně nebo sestupně podle zadané podmínky řazení. Transformace setříděním je pasivní transformace. Pro podmínku řazení se může použít parametr a hodnotu parametru definovat při konfiguraci.

Transformace převrácenou hodnotou je metoda transformace, při které se pro každý prvek datové sady použije převrácená hodnota:

$$y_i = \frac{1}{x_i} \quad (4)$$

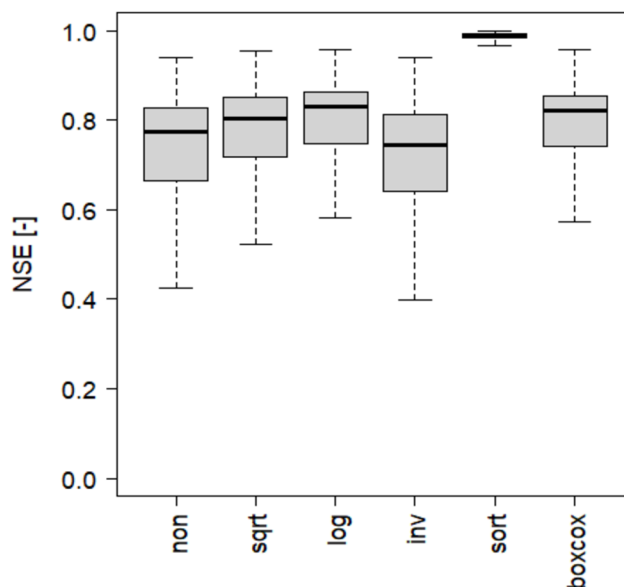
kde je  $x_i$  je hodnota  $i$ -té proměnné a  $y_i$  je transformovaná hodnota  $i$ -té proměnné.

## 5 Výsledky

V této části jsou prezentovány výsledky kalibrace modelu GR4J na souboru 200 povodí projektu MOPEX za použití různých metod transformace časových řad. Výsledky budou prezentovány formou krabicových a bodových grafů. Ve všech prezentovaných grafech jsou uvedeny zkratky použitých metod transformace, non = netransformovaná data, sqrt = transformace druhou odmocninou, log = logaritmická transformace, inv = transformace obrácenou hodnotou, sort = transformace setříděním, boxcox = Box-Coxova transformace.

### 5.1 Výsledky kalibrace modelu GR4J

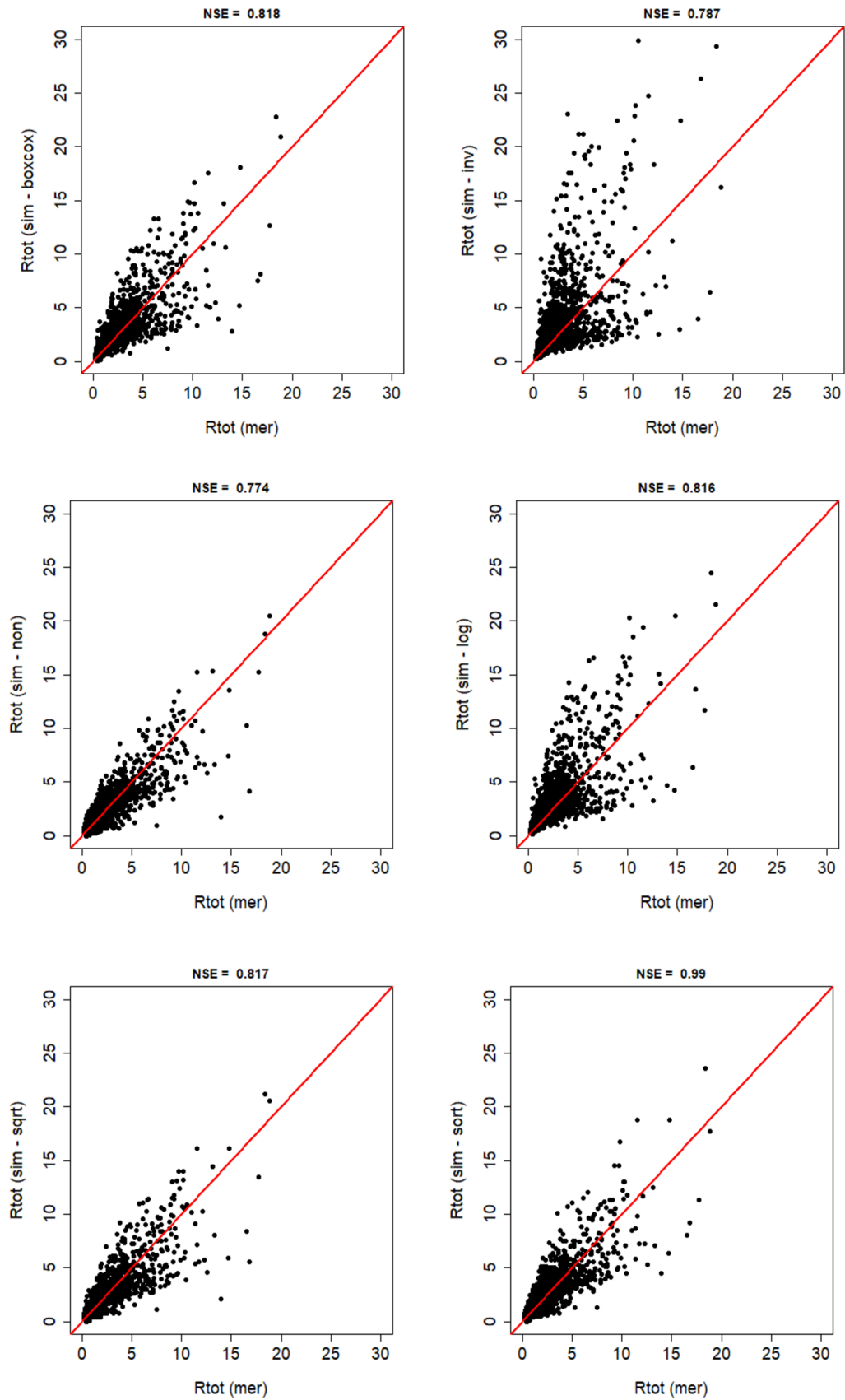
Model GR4J byl kalibrován na časové řadě 1. 1. 1955 do 31.12. 1967. V rámci kalibrace byla použita jednoletá „warming-up“ perioda od 1. 1. 1954 do 31. 12. Výsledky kalibrace modelu GR4J na 200 povodích jsou formou kritéria NSE prezentovány na obrázku č. 4



Obrázek č.4: Porovnání simulační účinnosti modelu GR4J v kalibraci při aplikaci vybraných metod transformací. V krabicovém grafu je medián znázorněn jako tučná černá čára. Dolní a horní kvartil jsou reprezentovány dolní a horní hranou krabice. Vousy na grafu představují 1,5-násobek mezikvartilového rozpětí, non jsou netransformovaná data, sqrt je transformace druhou odmocninou, log je logaritmická transformace, inv je transformace obrácenou hodnotou, sort je transformace setříděním, boxcox je Box-Cox transformace.

Z obrázku č. 4 je patrné, že nejvyšších simulačních účinností při kalibraci modelu GR4J bylo dosaženo při použití transformační metody sort, kdy medián NSE byl 0,991. Naopak nejnižší simulační účinnost modelu byla dosažena při použití transformační metody inv, kdy medián NSE byl 0,746. Rozdíl, který můžeme pozorovat u Box-Cox transformace (boxcox), u logaritmické transformace (log) a u transformace druhou odmocninou (sqrt) už tak značný není. Mediány NSE u těchto metod byly rovny 0,820 (boxcox), 0,829 (log) a 0,804 (sqrt). Dle tabulky č. 1 se dají tyto simulační výsledky označit jako velmi dobré. U kalibrace modelu GR4J, kdy nebyla použita žádná transformace (non) a data byla ponechána v původním stavu je hodnota mediánu NSE 0,773.

Na obrázku č. 5 je prezentováno porovnání pozorovaných a výsledných simulovaných odtoků založených na kalibraci modelu při použití zvolených transformačních metod pro vybrané povodí. Na ose y jsou zobrazeny hodnoty simulovaného odtoku, pokud byl model kalibrován s použitím dané transformační metody a na ose x jsou zobrazeny hodnoty pozorovaného odtoku. Vybrané povodí reprezentuje mediánovou simulační účinnost, pokud byla při kalibraci modelu použita netransformovaná data. Na obrázku č. 5 můžeme pozorovat výrazné rozdíly mezi simulovaným a pozorovaným odtokem pro každou transformační metodu, přestože vypočtené hodnoty NSE jsou relativně vysoké (viz např. NSE pro transformační metodu sort na obr. 5). Z obr. 5 je patrné, že při použití transformačních metod boxcox, inv a log při kalibraci modelu byly výsledné simulace zejména vysokých odtoků výrazněji nadhodnoceny. Naproti tomu, použití transformačních metod sqrt a netransformovaných dat při kalibraci modelu vedlo k menším rozdílům mezi simulací a pozorováním v oblastech vysokých a středních odtoků.

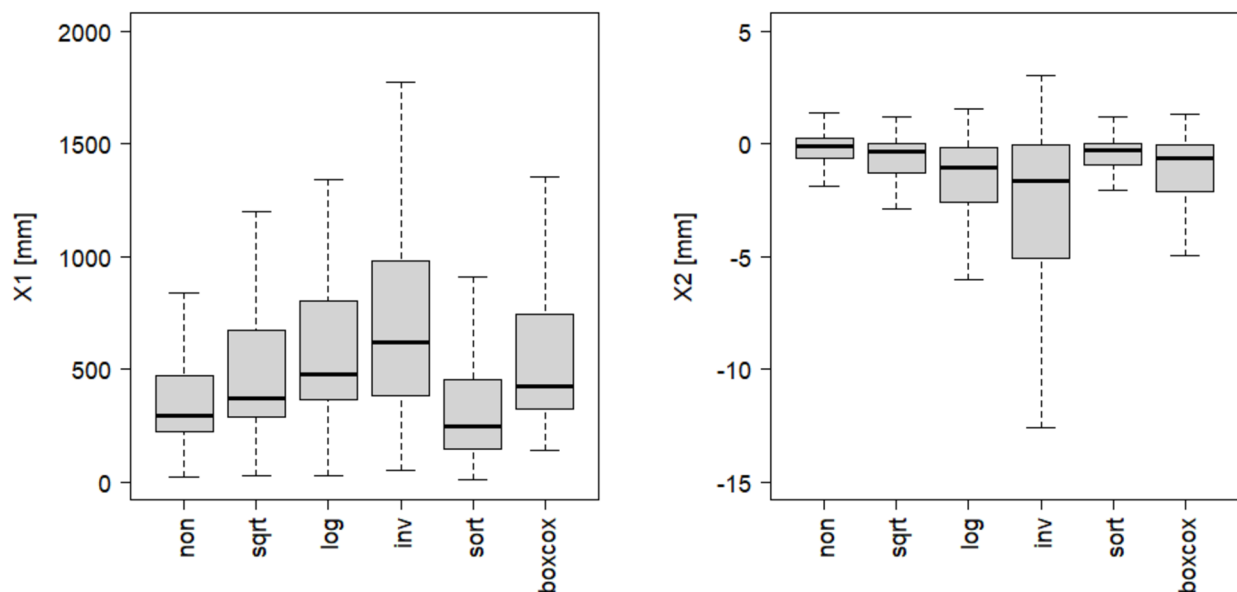


Obrázek č. 5: Porovnání odtoku naměřeného a odtoku simulovaného při aplikaci vybraných metod transformací.

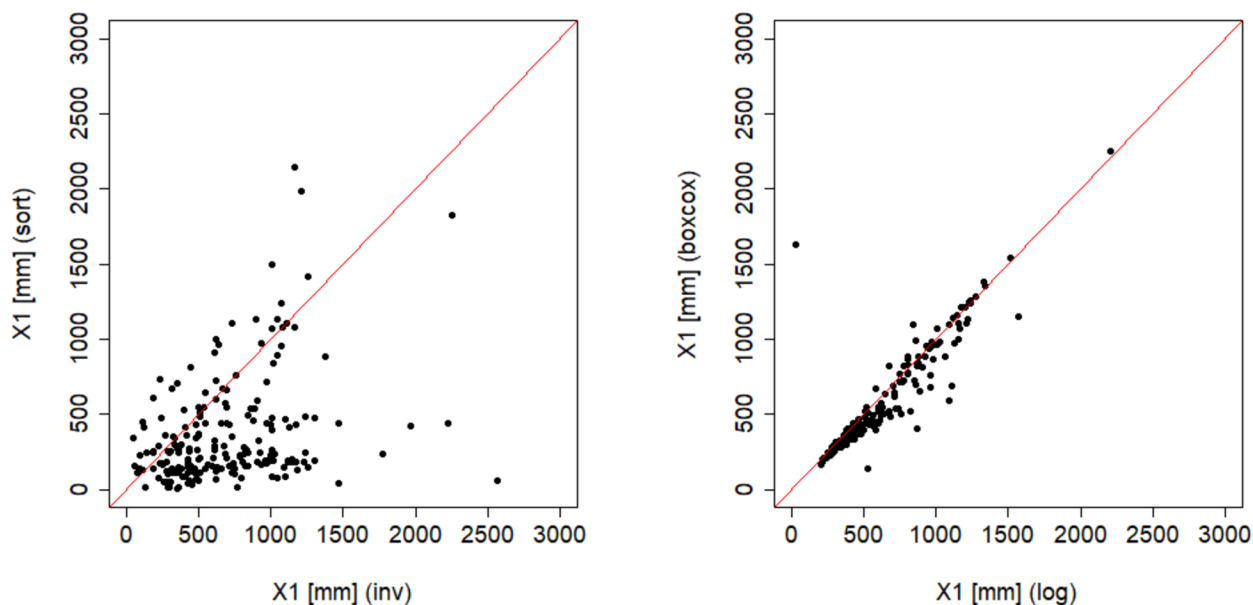
## 5.2 Porovnání hodnot parametrů modelu GR4J

Na obr. 6 a 9 jsou porovnány optimální hodnoty parametrů X1 (obr. 6 vlevo), X2 (obr. 6 vpravo), X3 (obr. 9 vlevo) a X4 (obr. 9 vpravo) pro 200 povodí projektu MOPEX získané při kalibraci modelu Gr4J založené na zvolených způsobech transformace časových řad pozorovaného a simulovaného odtoku při výpočtu.

Pro parametr X1 (viz obr. 6 vlevo) je patrné, že nejvyšší hodnoty tohoto parametru byly na řešeném souboru povodí získány při použití transformační metody inv (medián X1 byl 616 mm). Naopak nejnižší hodnoty parametrů X1 byly získány při kalibraci modelu s použitím transformační metody sort (medián X1 byl 247 mm). Rozdíl mezi optimálními hodnotami parametru X1 získaných při kalibraci modelu s použitím transformačních metod inv a sort je formou bodového grafu dále prezentován na obr. 7 vlevo. Výsledky dále ukazují výraznější podobnost optimálních hodnot parametru X1 při použití transformačních metod boxcox (medián X1 byl 424 mm) a log (medián X1 byl 477 mm), což je patrné z obr. 7 vpravo.

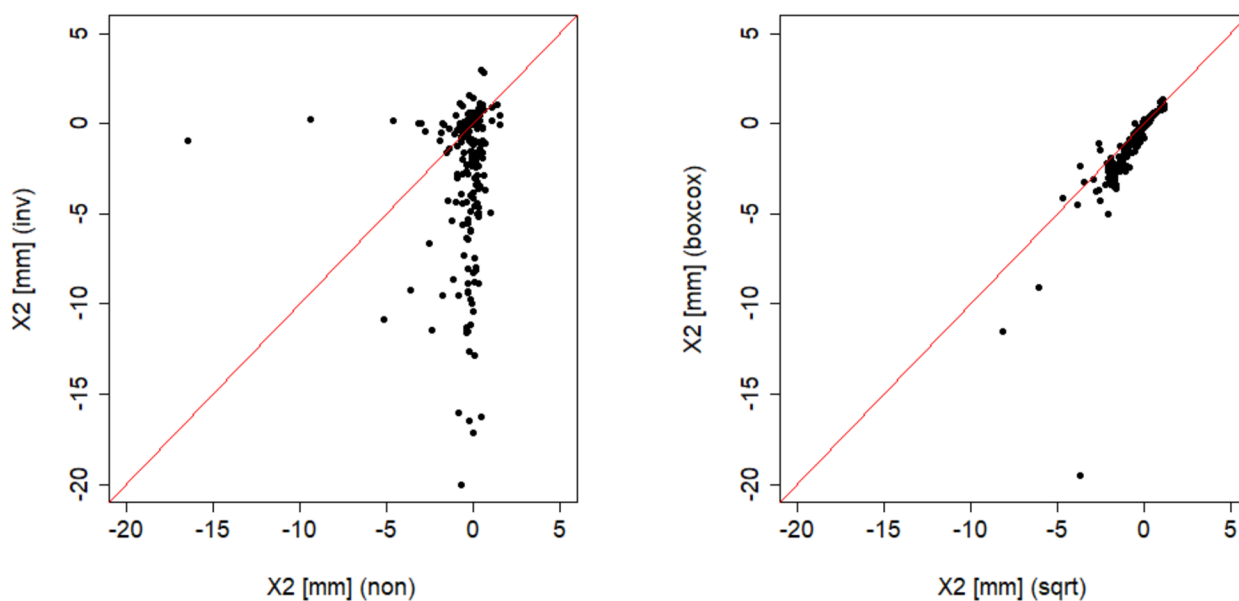


Obrázek č. 6: Hodnoty parametrů X1 (vlevo) a X2 (vpravo) získané při kalibraci modelu GR4J za použití vybraných metod transformace.



Obrázek č. 7: Rozdíl optimálních hodnot parametru X1 získaných při kalibraci modelu s použitím transformačních metod inv a sort (vlevo) a rozdíl optimálních hodnot parametru X1 získaných při kalibraci modelu s použitím transformačních metod boxcox a log (vpravo).

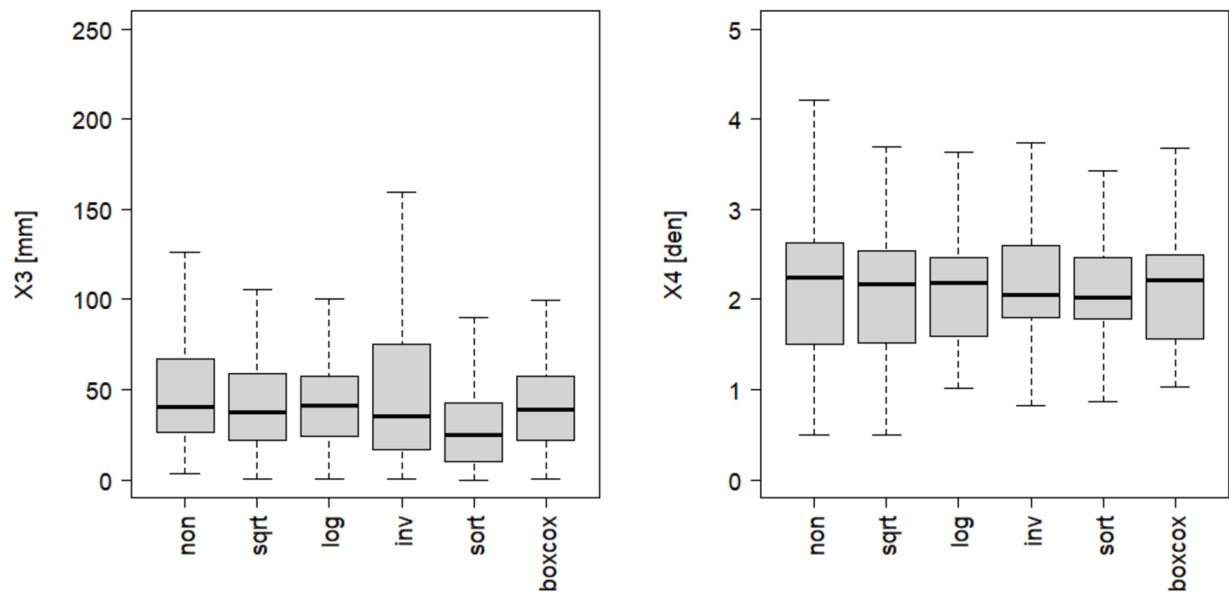
U parametru X2 (viz obrázek č. 6 vpravo) je zřejmé, že nejvyšší hodnoty tohoto parametru byly na řešeném souboru povodí získány při použití transformační metody non (medián X2 byl -0,12 mm). Naopak nejnižší hodnoty parametru X2 byly získány při kalibraci modelu s použitím transformační metody inv (medián X2 byl -1,62 mm). Rozdíl mezi optimálními hodnotami parametru X2 získaných při kalibraci modelu s použitím transformačních metod non a inv je formou bodového grafu dále prezentován na obrázku č. 8 vlevo. Výsledky dále ukazují výraznější podobnost optimálních hodnot parametru X2 při použití transformačních metod boxcox (medián X2 byl -0,65 mm) a sqrt (medián X2 byl -0,37 mm), což je patrné z obrázku č. 8 vpravo.



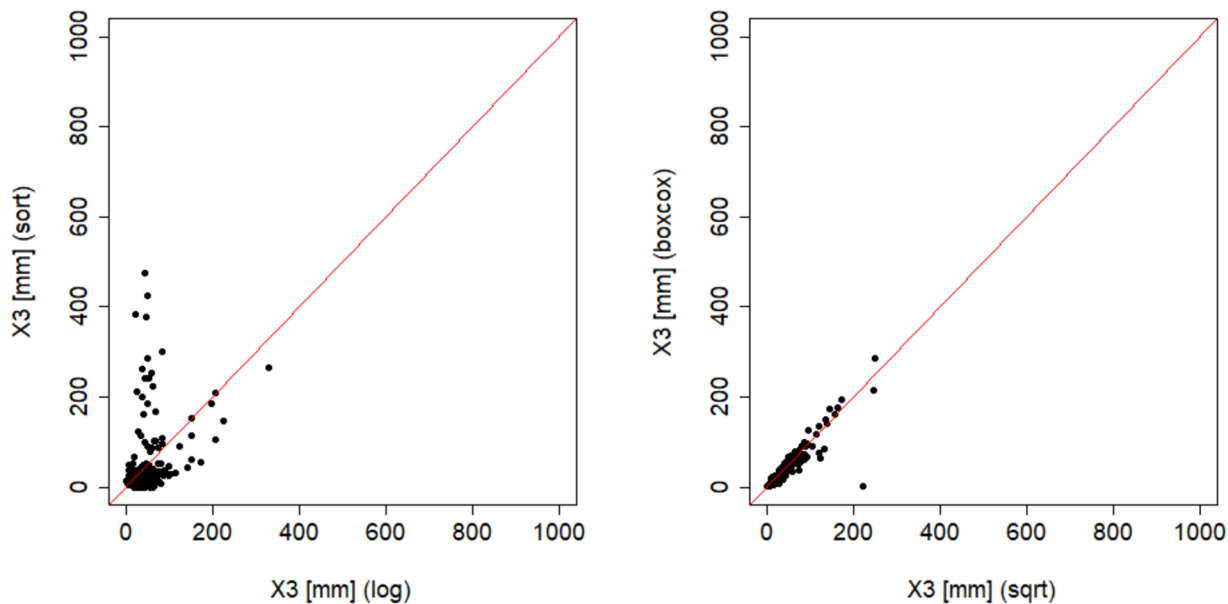
Obrázek č. 8: Rozdíl optimálních hodnot parametru X2 získaných při kalibraci modelu s použitím transformačních metod inv a non (vlevo) a rozdíl optimálních hodnot parametru X2 získaných při kalibraci modelu s použitím transformačních metod boxcox a sqrt (vpravo).

Pro parametr X3 (viz obrázek č. 9 vlevo) byly na řešeném souboru povodí nejvyšší hodnoty při použití transformační metody log (medián X3 byl 41 mm). Naopak nejnižší hodnoty parametrů X3 byly získány při kalibraci modelu s použitím transformační metody sort (medián X3 byl 25 mm). Rozdíl mezi optimálními hodnotami parametru X3 získaných při kalibraci modelu s použitím transformačních metod log a sort je formou bodového grafu dále prezentován na obrázku č.10 vlevo. Výsledky dále ukazují podobnost optimálních hodnot parametru X3 při použití transformačních metod boxcox (medián X3 byl 39 mm) a sqrt (medián X3 byl 38 mm), což je patrné z obrázku č. 10 vpravo.



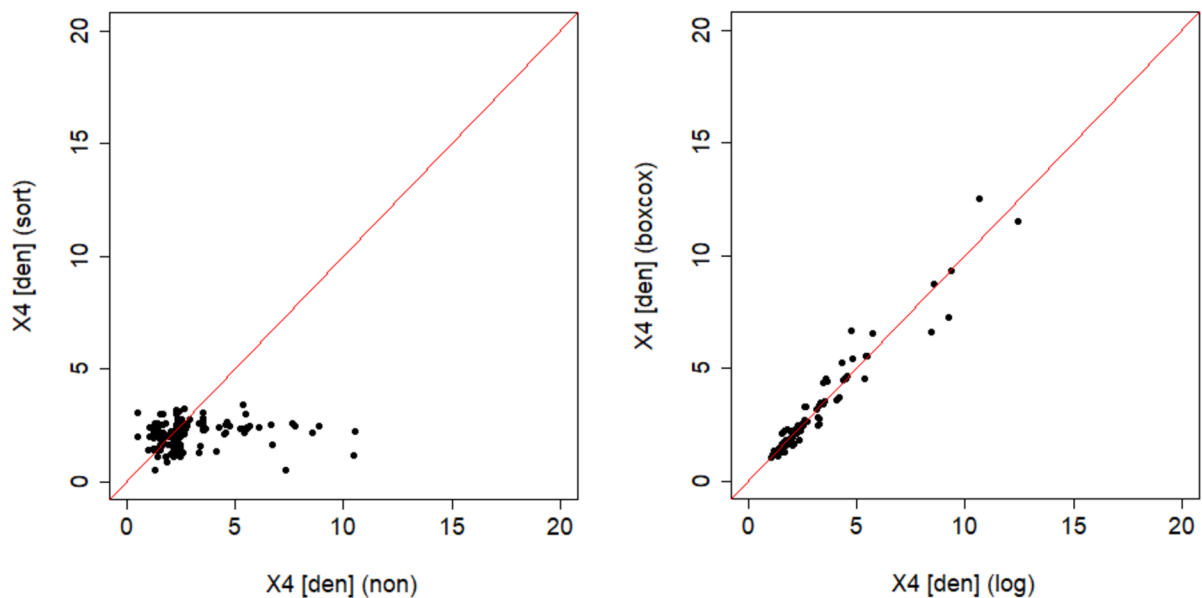


Obrázek č. 9: Hodnoty parametrů X3 (vlevo) a X4 (vpravo) získané při kalibraci modelu GR4J za použití vybraných metod transformace.



Obrázek č. 10: Rozdíl optimálních hodnot parametru X3 získaných při kalibraci modelu s použitím transformačních metod sqrt a log (vlevo) a podobnost optimálních hodnot parametru X3 získaných při kalibraci modelu s použitím transformačních metod boxcox a sqrt (vpravo).

U parametru X4 (viz obrázek č. 9 vpravo) jsou nejvyšší hodnoty tohoto parametru na řešeném souboru povodí při použití transformační metody non (medián X4 byl 2,24 dne). Naopak nejnižší hodnoty parametru X4 byly získány při kalibraci modelu s použitím transformační metody sort (medián X4 byl 2,02 dne). Rozdíl mezi optimálními hodnotami parametru X4 získaných při kalibraci modelu s použitím transformačních metod non a sort je formou bodového grafu dále prezentován na obrázku č. 11 vlevo. Výsledky dále ukazují výraznější podobnost optimálních hodnot parametru X4 při použití transformačních metod log (medián X4 byl 2,19 dne) a boxcox (medián X4 byl 2,21 dne), což je patrné z obrázku č. 11 vpravo.



Obrázek č. 11: Rozdíl optimálních hodnot parametru X4 získaných při kalibraci modelu s použitím transformačních metod sqrt a non (vlevo) a rozdíl optimálních hodnot parametru X4 získaných při kalibraci modelu s použitím transformačních metod boxcox a log (vpravo).

## 6. Diskuse výsledků

Z kapitoly 5.1 je zřejmé, že výběr transformační metody při kalibraci modelu má zásadní vliv na výsledné kalibrační hodnoty NSE. Při kalibraci modelu GR4J byly získány nejvyšší hodnoty NSE při použití transformační metody sort, což může vést k závěru, že právě tato transformační metoda je tou nejlepší volbou při kalibraci modelu. Nicméně, porovnání pozorovaných a simulovaných hodnot odtoku získaných při kalibraci modelu při použití transformační metody sort ukazuje, že i když je výsledná hodnota kritéria NSE blízká hodnotě 1 (viz obr. č. 5, kde  $NSE = 0,99$  při použití transformace sort), tak existují výrazné rozdíly mezi simulací a pozorováním. Důvodem, proč existuje tak výrazný rozdíl mezi výslednou hodnotou NSE a porovnáním pozorovaných a simulovaných odtoků při použití transformační metody sort souvisí s tím, že tato metoda transformace setřídí data podle velikostí a tím eliminuje porovnávání pozorovaných a simulovaných hodnot průtoku z konkrétního časového kroku (tzn. při výpočtu chyby mezi pozorováním a simulací jsou použity odtoky z různých časových kroků, které k sobě byly přiřazeny při setřídění).

Z výše uvedených důvodů je důležité vždy správně vybírat transformační metody s ohledem na cíle řešené studie, tj. pokud je cílem studie simulovat co nejpřesněji nízké průtoky, pak je vhodné vybírat transformační metody, které nejvíce zvýrazňují rozdíly mezi simulacemi a pozorováními nízkých průtoků (např. transformační metody inv, log a boxcox). Pokud je však studie zaměřena na co nejpřesnější simulace středních a vysokých průtoků, pak je nejvhodnější volbou transformace sqrt, nebo použití netransformovaných dat.

Transformační metody rovněž ovlivňují parametry modelu, což může mít dopad na výsledky. Ty jsou prezentovány v kapitole 5.2. U parametru X1 byly zaznamenány vyšší hodnoty tohoto parametru spojené s transformačními metodami inv, log a boxcox. To je způsobeno tím, že tyto metody cílí na nízké odtoky a přesnější simulace těchto odtoků jsou spojeny s vyššími hodnotami parametru X1. Zvýšení hodnoty parametru X1 vede k navýšení kapacity produkčního zásobníku, což může mít za následek snížení kulminace simulovaných odtoků a zpomalení jejich reakce na srážky. Naopak, nižší hodnoty parametru X1 jsou spojeny s transformačními metodami non a sort, které cílí

na vysoké odtoky. Nižší hodnoty parametru X1 mohou vést k rychlejšímu naplnění produkčního zásobníku a urychlení odtoku vody mimo produkční zásobník.

Vliv transformačních metod na parametr X2 není tak jednoznačný jako u parametru X1. X2 slouží jako kompenzační parametr, který kompenzuje chyby ve vstupních datech a struktuře modelu. Extrémně odlišné hodnoty X2 jsou patrné pouze u transformační metody inv v porovnání s ostatními metodami. Transformační metoda inv se zaměřuje hlavně na nejnižší odtoky, což může ovlivnit chování parametru X2.

Vliv transformačních metod na parametr X3 je v podstatě nevýrazný, neboť X3 určuje maximální zásobu transformačního zásobníku, do kterého směřují již ovlivněné toky z produkčního zásobníku. Transformační metody přímo neovlivňují velikost tohoto zásobníku.

Podobně je tomu tak u vlivu transformačních metod na parametr X4. Vliv je v podstatě nevýrazný, protože X4 řeší časové zpoždění. Všechny testované transformační metody ovlivňují pouze velikost odtoku, ale ne jeho posun v čase.

## 7. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vyhodnocení vlivu vybraných metod transformace časových řad při výpočtu kritéria simulační účinnosti na kalibraci srážko-odtokového modelu GR4J. V rámci případové studie byl k analýze použit soubor 200 povodí projektu MOPEX. Při kalibraci modelu GR4J bylo využito 6 transformačních metod: Box-Cox transformace, transformace druhou odmocninou, transformace setříděním, logaritmická transformace, transformace obrácenou hodnotou a netransformovaná data.

Výsledky kalibrace, vyhodnocené pomocí kritéria NSE, potvrdily robustnost struktury modelu. Získané výsledky naznačují, že model je schopen dobře zachytit sledované hydrologické jevy. Simulační účinnost dosáhla uspokojivých hodnot, což potvrzuje schopnost modelu věrně reprodukovat sledované hydrologické procesy.

Dále, výsledky případové studie naznačují, že volba různých metod transformace časových řad má významný vliv na simulační účinnost modelu GR4J. Tato případová studie jasně ukazuje, že způsob transformace časových řad pozorovaného a simulovaného odtoku při výpočtu kritéria simulační účinnosti NSE v rámci kalibračního procesu ovlivňuje výsledné hodnoty NSE a optimální parametry modelu GR4J.

## 8. Seznam použité literatury

ADEM, G., 2005: Modeling groundwater-surface water interaction by coupling MODFLOW with WetSpa. M.Sc. Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

ASCE, 1982: Task Committee on Glossary of Hydraulic Modeling Terms Modeling Hydraulic Phenomena In: Introduction to Hydrology, Viessman, W. and G.L.Lewis (Eds.). Prentice-Hall, USA., pp: 454-455.

ATKINSON, A.C., RIANI, M., CORBELLINI, A., 2021: The Box–Cox Transformation: Review and Extensions. *Statist. Sci.* 36 (2) 239–255, <https://doi.org/10.1214/20-STS778>

BECKER, A., SERBAN, P., 1990: Hydrological model design and operation. Operational Hydrology Report No. 34, WMO, Geneva, 80 s..

BEVEN, K., 2001: Rainfall-Runoff modelling. The Primer. John Wiley and Sons, Chichester, UK, 1-360 pp.

BEVEN, K., 2004: Robert E. Horton's perceptual model of infiltration processes, *Hydrological processes*, 18, 3447-3460.

BEVEN, K.J., 2009: Environmental modelling: an uncertain future? Routledge, London, 1-310 pp.

BLACK, P.E., 1975: Runoff from watershed models. *Water Resources Research* 6:465-477.

BOX, G. E. P. AND COX, D. R., 1964: An analysis of transformations, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 26, 211-252.

BOYLE, D.P., GUPTA, H.V. AND SOROOSHIAN, S., 2000: Towards improved calibration of hydrologic models. Combining the strengths of manual and automatic methods, *Water Resources Research*, 36(12), 3663-3674.

BROCCA, L., MORAMARCO, T., MELONE, F., WAGNER, W., HASENAUER, S., HAHN, S., 2012: Assimilation of surface – and root-zone ASCAT soil moisture products into rainfall-runoff modeling. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 50 (7 PART1) 2542-2555

- BURGES, S.J., 1986: Trends and directions in hydrology. *Water Resources Research*, Volume 22, Issue 9S, p.1S-55
- CLARKE, R.T., 1973: *Mathematical models in hydrology*. Irrigation and Drainage paper No. 19, FAO, Rome
- CRAWFORD, H. H., LINSLEY, R.K., 1966: *Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV*. Technical Report No. 39, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford.
- CROKE, B.F.W., 2007: The role of uncertainty in design of objective functions, MODSIM 2007, International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand. pp. 2541-2547.
- ČHMÚ, 2001: *Historie hydrologie na území Čech, Moravy a Slezska*. online: [https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/prezentace\\_a\\_vyuka/HYDROLOGIE/01\\_historie\\_hydro\\_v1.pdf](https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/prezentace_a_vyuka/HYDROLOGIE/01_historie_hydro_v1.pdf)
- DAŇHELKA, J., KREJČÍ, J., ŠÁLEK, M., ŠERCL, P., ZEZULÁK, J., 2002: *Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR*. ČZÚ, Praha, 214 s.
- DAWDY, D. R., LICHTY, R. W., BERGMANN, J. M., 1972: *A Rainfall-Runoff Simulation Model for Estimation of Flood Peaks for Small Drainage Basins*. Synthesis in hydrology. Geological survey professional paper 506-B.
- DEEPESH MACHIWAL, D., JHA, M.K., 2006: Time series analysis of hydrologic data for water resources planning and management: a review. *J. Hydrol. Hydromech.*, 54, 3, 237–257.
- DINGMAN, S.L, 2002: *Physical Hydrology* second edition, 25-33.
- DOOGE, J. C. I., 1973: *Linear theory of hydrologic systems*. Technical Bulletin No. 1468, U.S. Dept. of Agriculture.
- DUAN Q., SCHAAKE J., ANDREASSIAN V., FRANKS S., GOTETI G., GUPTA, H. V., GUSEV Y. M., HABETS 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 67 Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops. *Journal of Hydrology* 320(1–2), 3–17. ISBN: 0022-1694.

- DUAN, Q., GUPTA, V.K. AND SOROOSHIAN, S., 1993: A shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 76(3), 501-521.
- DUNN, S.M., FREER J., WEILER, M., KIRKBY, M. J., SEIBERT, J., QUINN, P.F., LISCHEID, G., TETZLAFF, D. AND SOULSBY, C., 2008: Conceptualization in catchment modelling: simply learning?, *Hydrological Processes*, 22(13), 2389-2393.
- EDIJATNO, MICHEL, C., 1989: Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche* (2): 113–121.
- FENICIA, F., SAVENIJE, H.H.G., MATGEN, P. AND PFISTER, L., 2008: Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement, *Water Resources Research*, 44(W01402).
- FLEMING, G., 1979: Deterministic models in hydrology. Irrigation and Drainage paper, 32, FAO, Rome, 80 s.
- FOLSE, J. A., 1929: A new method of estimating streamflow: Carnegie Inst. Washington Rept. 400, 237 s.
- GOSAIN, A.K, A. MANI AND C. DWIVEDI, 2009: Hydrological Modelling-Literature Review. Climawater, Report NO.1.
- GREEN, W.H., AMPT, G., 1911: Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils, *J. Agric. Sci.*, 4(1), 1-24.
- GUPTA, H.V., KLING, H., YILMAZ, K.K. AND MARTINEZ, G.F., 2009: Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80-91.
- Hallett, S.H., Bullock, P. and Baillie, I., 2006: Towards a World Soil Survey Archive and Catalogue, *Soil Use and Management*, 22(2), 227-228.
- HORTON, R. E., 1939: Approach toward a physical interpretation of infiltration capacity: *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Vol. 5. P. 399-417.
- HRACHOWITZ, M., FOVET, O., RUIZ, L., EUSER, T., GHARARI, S., NIJZINK, R., et al., 2014: Process consistency in models: the importance of system signatures, expert knowledge, and process complexity. *Water Resour. Res.*, 50 (9), 7445-7469



CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R., MAYS, L.W., 1988: Applied hydrology. McGraw-Hill, New York

JACKSON, B.M., 2007: Modelling water and solute transport within vegetated soils using a stochastic framework. PhD Dissertation Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, 1-386 pp.

JENÍČEK, M., 2005: Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích, In LANGHAMMER, J., Vliv změn přírodního prostředí povodí a údolní nivy na povodňové riziko, PřF UK, Praha: 112-126.

JENÍČEK, M., 2009: Modelování srážko-odtokových procesů na malých a středně velkých povodích. Univerzita Karlova V Praze, Přírodovědecká fakulta.

KING, H.W., WHISLER, C.O., WOODBURN, G., 1960: Hydraulic Similitude and Dimensional Analysis. Pp. 318-330 in Hydraulics, 5th edition, New York. John Wiley & Sons.

KING, H.W., WHISLER, C.O., WOODBURN, G., 1960: Hydraulic Similitude and Dimensional Analysis. Pp. 318-330 in Hydraulics, 5th edition, New York. John Wiley & Sons.

KLEMES, V., 1986: Operational testing of hydrological simulation models, Hydrological Sciences Journal, 31(1), 13-24.

KODJA, D.J., SÉGLA AKOIGNONGBÉ, A.J., AMOUSSOU, E., MAHÉ, G., VISSIN, E.W., PATUREL, J.E., and HOUDENOU, C., 2020: Calibration of the hydrological model GR4J from potential evapotranspiration estimates by the Penman-Monteith and Oudin methods in the Ouémé watershed (West Africa). IAHS, 383, 163.169

KOREN, V., MOREDA, F. AND SMITH, M., 2008: Use of soil moisture observations to improve parameter consistency in watershed calibration, Physics and Chemistry of the Earth, 33(17-18), 1068-1080.

KUNDU, D., VERVOORT, R.W., VAN OGTROP, F.F., 2017: The value of remotely sensed surface soil moisture for model calibration using SWAT. Hydrol. Process., 31(15), 2764-2780

LOHANI, A.K., 2018: Rainfall-Runoff Analysis and Modelling. National Institute of Hydrology: Roorkee, India

- LUFU, S., SUHARTANTO, E., RISPININGTATI, R., 2020: Hydrological Analysis of TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) Data in Lesti Sub Watershed. *Civil and Environmental Science*. 003(01), 018-030.
- MCINTYRE, N. AND AL-QURASHI, A., 2009: Performance of ten rainfall-runoff models applied to an arid catchment in Oman, *Environmental Modelling & Software*, 24(6), 726-738.
- MEIN, R.G., LARSON, C.L., 1973: Modeling infiltration during a steady rain, *Water Resources Research*, 9(2), 384-394.
- MICHEL, C., 1991: *Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux*. Hydrology handbook (in French), Cemagref, Antony, France.
- MOORE, C., DOHERTY, J., 2005: Role of the calibration process in reducing model predictive error, *Water Resources Research*, 41(W05020).
- NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V., 1970: River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.
- NASSIF, S.H., WILSON, E.M., 1975: The influence of slope and rain intensity on runoff and infiltration. *Hydrological Sciences Bulletin* 20:539-553.
- ORELLANA, B., PECHLIVANIDIS, I.G., MCINTYRE, N., WHEATER, H.S. AND WAGENER, T., 2008: A toolbox for the identification of parsimonious semi-distributed rainfall-runoff models: Application to the Upper Lee catchment, in *iEMSs 2008: International Congress on Environmental Modelling and Software*, 1, 670–677, 7-10 July, Barcelona, Spain.
- LOUDIN, L., HERVIEU, F., MICHEL, C., PERRIN, C., ANDREASSIAN, V., ANCTIL, F., LOUMAGNE, C., 2005: Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?; Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling, *Journal of Hydrology*, Volume 303, Pages 290–306.
- PECHLIVANIDIS, I., JACKSON, B., MCINTYRE, N., 2011: Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global NEST Journal* 13(3):193-214

- PECHLIVANIDIS, I.G., JACKSON, B., MCMILLAN, H., 2010a: The use of entropy as a model diagnostic in rainfall- runoff modelling, in iEMSs 2010: International Congress on Environmental Modelling and Software, 5- 8 July, Ottawa, Canada.
- PECHLIVANIDIS, I.G., MCINTYRE, N.R. AND WHEATER, H.S., 2010b: Calibration of the semi-distributed PDM rainfall-runoff model in the Upper Lee catchment, UK, *Journal of Hydrology*, 386(1-4), 198-209.
- PERRIN, C., MICHEL, C., ANDRÉASSIAN, V., 2003: Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.* 279 (1–4): 275–289.
- PUSHPALATHA, R., PERRIN, C., LE MOINE, N. AND ANDRÉASSIAN, V., 2012: A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. *Journal of Hydrology*, 420-421, 171-182, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.11.055.
- RAJAT P. ATHIRA 2021: Calibration of hydrological models considering process interdependence: A case study of SWAT model. *Environmental Modelling & Software*, Volume 144, 105131.
- RAJIB, M.A., MERWADE, V., YU, Z., 2016: Multi-objective calibration of a hydrologic model using spatially distributed remotely sensed/in-situ soil moisture. *J.Hydrol.* 536, 192-207
- RUPPERT, D. 2001: Statistical Analysis, Special Problems of: Transformations of Data, *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, 15007-15014.
- SEIBERT, J., 1997: Estimation of parameter uncertainty in the HBV model. *Nordic Hydrol.*, 28 (4-5) 247-262
- SEIBERT, J., MCDONNELL, J.J., 2002: On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: use of soft data for multicriteria model calibration. *Water Resour. Res.*, 38 (11)
- SEIBERT, J., MCDONNELL, J.J., 2015: Gauging the ungauged basin: relative value of soft and hard data. *J. Hydrol. Eng.*, 20 (1), A4014004
- SHERMAN, L. K., 1932: Streamflow from rainfall by the unit hydrograph method: *Eng. News Record*, Vol. 108: 501-505.
- SCHAEFLI, B. AND GUPTA, H., 2007: Do Nash values have value?, *Hydrological Processes*, 21: 2075-2080.

SINGH, V.P. AND FREVERT, D., 2006: Watershed models. Boca Raton, Taylor & Francis.

SINGH, V.P. AND WOOLHISER, D.A., 2002: Mathematical modeling of watershed hydrology, *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 270-292.

SINGH, V.P., 1995: Computer models of watershed hydrology, Water Resources Publications, LLC, USA.

SMITH, J. A., 2022: Temporal Transformation Effects on Hydrological Model Calibration. *Hydrological Processes*, Volume 28, Issue 3, Pages 451-468.

SOROOSHIAN, S. AND DRACUP, J.A., 1980: Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff models – correlated and heteroscedastic error cases, *Water Resources Research*, 16(2), 430-442.

SOROOSHIAN, S. AND GUPTA, V.K., 1995: Model Calibration, Computer models of watershed hydrology, edited by Singh, V.P., Water Resources Publications, USA.

STEPHENSON, G.R. AND FREEZE, R.A., 1974: Mathematical simulation of subsurface flow contributions to snowmelt runoff, Reynolds Creek watershed, Idaho, *Water Resources Research*, 10, 284-294.

VAN WERKHOVEN, K., WAGENER, T., REED, P. AND TANG, Y., 2009: Sensitivity-guided reduction of parametric dimensionality for multi-objective calibration of watershed models, *Advances in Water Resources*, 32(8), 1154-1169.

VRUGT J.A., ROBINSON, B.A. AND HYMAN, J.M., 2008a: Self-adaptive multimethod search for global optimization in real-parameter spaces, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(2), 1-17.

VRUGT, J.A., GUPTA, H.V., BASTIDAS L.A., BOUTEN, W. AND SOROOSHIAN, S., 2003: Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models, *Water Resources Research*, 39(8), 1214.

VRUGT, J.A., TER BRAAK, C.J.F., CLARK, M.P., HYMAN, J.M. AND ROBINSON, B.A., 2008b: Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation, *Water Resources Research*, 44(W00B09).

- WAGENER, T., SIVAPALAN, M., TROCH, P., WOODS, R., 2007: Catchment Hydrology and the Complexity Paradigm. *Water Resources Research*, 43(12).
- WAGENER, T., WHEATER, H.S. AND GUPTA, H.V., 2004: *Rainfall-Runoff Modelling in Gauged and Ungauged Catchments*. Imperial College Press, London, UK, 1-306 pp.
- WANG, Z., O.BATELAAN AND F. DE SMEDT, 1996: A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). *Phys. Chem. Earth*, 21: 189-193.
- WHEATER, H.S., 2002: Progress in and prospects for fluvial flood modelling. 360 (1796), *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*.
- WHEATER, H.S., JAKEMAN, A.J., BEVEN, K.J., BECK, M.B. AND MCALEER, M.J., 1993: Progress and directions in rainfall-runoff modelling, *Modelling change in environmental systems*, New York, pp. 101-132.
- WHITE, K.L., CHAUBEY, I., 2005: Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 41 (5), 1077-1089
- YAPO, P.O., GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., 1998: Multi-objective global optimization for hydrologic models, *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 83-97.