VYUŽITÍ GENERÁTORU SRÁŽEK PRO VÍCEROZMĚRNOU PRAVDĚPODOBNOSTNÍ ANALÝZU POVRCHOVÉHO ODTOKU

***Pavel Fošumpaur*[1]**

Abstrakt

V teorii nádrží a vodohospodářských soustav u nás dosud převažuje deterministický přístup, kdy vodní zdroje jsou většinou navrhovány a řízeny s využitím tzv. návrhových událostí, které vycházejí z historických pozorování. Kvalitativně vyšším přístupem je využití stochastických simulačních modelů za využití metody Monte-Carlo, které umožňují kvantifikaci spolehlivosti vodních zdrojů a rizik spojených s jejich poruchami. Zatímco tento přístup je dobře propracován pro případ strategického řízení zásobní funkce nádrží, v oblasti povodňového řízení odtoku není dosud uspokojivě vyřešen. Příspěvek přináší metodický postup pro přípravu stochasticky generovaných meteorologických a hydrologických dat pro potřeby navrhování a řízení retenční funkce nádrží a vodohospodářských soustav a posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních.

Klíčová slova: generátor srážek, kontinuální simulace, vícerozměrná frekvenční analýza

1. Úvod

Dosavadní aplikace kontinuálních simulací ve vodním hospodářství se většinou zaměřovaly pouze na jednorozměrnou frekvenční analýzu ročních kulminačních průtoků. Navrhování nádrží a vodohospodářských soustav na návrhové události dané kvantily pouze jediné charakteristiky povodňového režimu může však být nespolehlivé. Ve skutečnosti jsou nároky na retenční funkci nádrží během povodní dány souborem více charakteristik povodňového režimu a jejich nejrůznějších kombinací. Jedná se zejména o kulminační průtok povodně, objem povodňové vlny a dobu trvání povodně. V příspěvku je popsán metodický postup pro zpracování vícerozměrné frekvenční analýzy povodňového režimu za využití kontinuální simulace. Výhodou postupu je skutečnost, že nevyžaduje rozsáhlé historické pozorování průtoků v zájmovém profilu. Pro potřeby odhadu sdružených distribučních funkcí je využita progresivní metoda Copulí. Kvantifikovány jsou rovněž podmíněné pravděpodobnosti objemů povodňových vln v závislosti na velikosti kulminace povodně. Podrobně je problematika pojednána v [2].

2. Generátor srážek

Ačkoliv historický vývoj stochastických generátorů srážek počíná přibližně již od padesátých let minulého století, v poslední době se značně urychluje, což je dáno rostoucí motivací uživatelů z různých aplikačních oblastí. Ucelený přehled historie stochastických generátorů srážek podává Wilks a Wilby [6]. Většina generátorů umožňuje simulaci denních srážkových úhrnů, které lze následně desagregovat do menších, např. hodinových úhrnů pomocí speciálních postupů popsaných dále.

Technologie modelování denních srážkových úhrnů je zpravidla rozdělena do dvou nezávislých etap, z nichž první představuje tzv. model výskytu srážky (Precipitation Occurrence Model). Jeho úkolem je generování sekvence bezesrážkových dnů a dnů se srážkou. Princip metod vychází z Markovových řetězců.

Pro sestavení modelu je třeba odvodit systém podmíněných pravděpodobností výskytu srážkového dne v závislosti na sekvenci srážkových, resp. bezesrážkových dnů v předchozím období. Délka předchozího období reprezentuje řád Markovova řetězce a může být různá pro dny v různých kalendářních měsících, stejně jako hledané podmíněné

pravděpodobnosti (pravděpodobnosti přechodu). Pro optimalizaci řádu Markovova řetězce pro dny v jednotlivých kalendářních měsících lze využít věrohodnostní ukazatele AIC nebo BIC [2].

V následujícím kroku jsou generovány srážkové úhrny ve dnech, které předchozí model označil jako srážkové (Precipitation Amount Model). Z literatury vyplývá, že patrně nejoblíbenějším typem rozdělení pravděpodobnosti pro denní srážkové úhrny je dvouparametrické gamma rozdělení. V minulosti se pro tyto účely rovněž osvědčilo Pareto rozdělení pravděpodobnosti, popř. dvouparametrické exponenciální rozdělení.

Srážkové výšky se generují pomocí generátoru náhodných čísel daného typu rozdělení pravděpodobnosti. Většina generátorů srážek přitom vychází z předpokladu, že srážkové úhrny jsou v sérii po sobě jdoucích dnů se srážkou vzájemně nezávislé. Srážkové úhrny jsou potom generovány naprosto náhodně a nezahrnuje se tak možná korelační vazba sousedních srážkových úhrnů. Tato skutečnost vychází z poznatku, že autokorelační vazby v řadách po sobě následujících nenulových srážkových úhrnů jsou na úrovni denního kroku statisticky často nevýznamné. Naopak při jemnějším časovém kroku, což je případ hodinových srážkových úhrnů, nelze již autokorelační vazby nenulových srážkových úhrnů zanedbat.

Generování denních teplot vzduchu vychází z postupu podle Richardsona [4], který vytvořil model pro potřeby optimalizace zemědělské produkce. Jeho model umožňuje simulaci dalších klíčových faktorů kromě srážek, které mají vazbu na zemědělskou produkci. Jedná se o denní maximální a minimální teploty a sluneční záření. Model využívá pro genezi ostatních meteorologických veličin (kromě srážek) technologii vícerozměrných regresních modelů s uvážením vlivu výskytu srážky. Pro desagregaci denních srážkových úhrnů na kratší (např. hodinové) úhrny je využita metoda multiplikativní kaskády [3].

3. Kontinuální simulace srážko-odtokového procesu

Simulace srážko-odtokového procesu využívá jako vstupy předem namodelované synchronní řady srážek a teplot. Výstupem je kontinuální simulace průtoků v uzávěrovém profilu povodí, popř. v předem definovaných profilech říční sítě. Simulace průtoků je realizována v hodinovém kroku, aby bylo možné její výsledky využít pro frekvenční analýzu a pro potřeby výše formulovaných úloh návrhu a řízení nádrží a vodohospodářských soustav.

Simulace průtoků je realizována pomocí hydrologického deterministického modelu, který umožňuje kontinuální simulaci. Nelze tedy použít epizodní hydrologické modely. Vhodný hydrologický model by měl obsahovat moduly pro následující procesy:

- řešení srážko-odtokového vztahu (výpočet povrchového a podzemního odtoku),
- řešení transformace průtoků v říční síti,
- simulace tání sněhu.

V rámci případové studie byl využit hydrologický model AQUALOG firmy Aqualogic, jehož podrobný popis je uveden např. v [7]. Při testování syntetických řad dlouhých srážko-odtokových simulací je důležité vycházet z hlavního cíle a charakteru zadané vodohospodářské úlohy. Zde platí, že možnosti využití kontinuálních simulací podle výše popsaného modelu jsou ve vodním hospodářství i v teorii nádrží a vodohospodářských soustav velmi široké. Přitom konkrétní charakter úlohy vždy předurčuje požadavek na shodu vybraných charakteristik vstupních a výstupních řad. Různé mohou být požadavky na shodu charakteristik v případě využití kontinuální simulace pro návrh systémů a řízení systémů, pro řešení zásobní funkce nádrží a retenční funkce, pro posuzování dopadů klimatické změny, atd. Dále u některých úloh je požadována shoda většího množství charakteristik, popř. dokonce všech a u jiného typu úloh postačí shoda pouze několika málo vlastností.

4. Frekvenční analýza povrchového odtoku

Technika využití srážkového generátoru ve spojení s hydrologickým modelem umožňuje odvození dlouhých kontinuálních simulací, které mohou být následně využity pro analýzu frekvenčních charakteristik povodňového režimu. Nejčastějším případem je dle literatury využití technologie kontinuální simulace pro analýzu frekvenčních vlastností kulminačních průtoků a pro odvození maximálních průtoků s malými pravděpodobnostmi překročení. Tomuto tématu se v minulosti systematicky věnovalo mnoho autorů, např. Blažková a Beven [1]. Autoři většinou kalibrují parametry srážkového generátoru a hydrologického modelu pomocí výsledků mnoha kontinuálních simulací, kdy kritériem pro přijetí modelu je míra shody s čárou překročení maximálních průtoků stanovenou z pozorovaných průtokových dat.

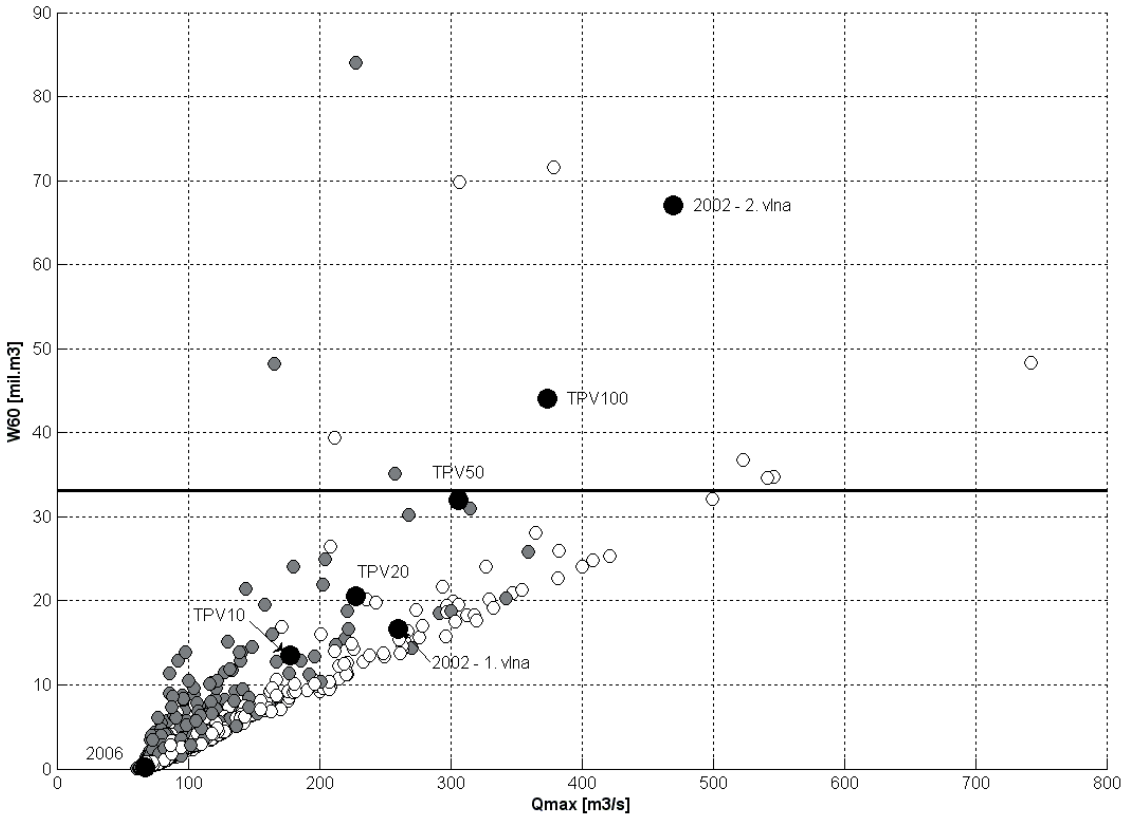
Současný trend v oblasti povodňového řízení odtoku se ubírá cestou kvantifikace sdružených pravděpodobností různých charakteristik povodní. Bylo prokázáno, že navrhování nádrží a vodohospodářských soustav na návrhové události dané kvantily pouze jediné charakteristiky povodňového režimu (zpravidla kulminačního průtoku) může být nespolehlivé a ve svém důsledku může vést k podhodnocení nebo naopak nadhodnocení parametrů nádrží (retenční objem, kapacita přelivů, atd.). Ve skutečnosti jsou nároky na retenční funkci nádrží během povodní dány souborem více charakteristik povodňového režimu a jejich nejrůznějších kombinací. Jedná se zejména o kulminační průtok povodně, objem povodňové vlny a dobu trvání povodně. Teorie vícerozměrných rozdělení pravděpodobnosti je známá řadu let. Její aplikace ve stochastické hydrologii pro kvantifikaci pravděpodobnostních vlastností povodňového režimu začaly být systematicky propracovávány teprve nedávno a v podstatě dosud převažují jednorozměrné postupy pro kulminační průtoky povodní. Tato skutečnost je dána jednak nedostatkem historických pozorování pro spolehlivý odhad parametrů vícerozměrných rozdělení pravděpodobnosti a jednak dalšími výpočetními obtížemi. Mezi ty se řadí zejména skutečnost, že marginální rozdělení pravděpodobnosti jednotlivých povodňových charakteristik jsou zpravidla silně asymetrická a dále skutečnost, že by měla být pro jednotlivé charakteristiky povodní stejného typu.

Nejvýznamnější vazba pro potřeby navrhování a řízení nádrží a vodohospodářských soustav je bezesporu mezi kulminačním průtokem povodně a jejím objemem. Tradiční přístup aproximace těchto dvou charakteristik pomocí asymetrického dvourozměrného rozdělení pravděpodobnosti doporučuje často různé typy dvourozměrného Gumbelova extremálního rozdělení.

Pro účely vícerozměrných frekvenčních analýz je v posledních letech s úspěchem využívána teorie Copulí, kterou formuloval Sklar [5]. Jedná se o postup, kdy pro aproximaci pravděpodobnostních vlastností vícerozměrného vztahu jsou využívány marginální rozdělení pravděpodobnosti jednotlivých veličin. Výhodou metody Copule je možnost jejího nasazení na případy, kdy jednotlivé marginální veličiny mají různé typy rozdělení pravděpodobnosti. Metoda je z tohoto pohledu velmi univerzální a je v současnosti využívána pro aproximaci asymetrických vícerozměrných problémů v hydrologii.

Význam vícerozměrné frekvenční analýzy spočívá zejména ve skutečnosti, že poskytuje oproti standardnímu jednorozměrnému postupu kvalitativně vyšší míru informace o pravděpodobnostních vlastnostech povodňového režimu v daném profilu. Jako velmi nadějná se jeví její kombinace s technologií kontinuální simulace. Celý postup nyní demonstrujme na případové studii povodí nádrže Lipno I.

Nejprve byly v 1000leté kontinuální simulaci přítoků do nádrže Lipno I vyhledány všechny povodňové vlny, jejichž kulminace Q_{max} překročila hodnotu jednoletého průtoku Q_1. Současně byly určeny objemy jednotlivých povodní W_{60} nad zvolenou hodnotou neškodného odtoku $O_{ne,1}$ = 60 $m^3.s^{-1}$. Povodně tak byly popsány dvěma základními charakteristikami Q_{max} (kulminace) a W_{60} (objem) a jsou vyneseny do grafu na Obr. 1, ve kterém jsou dále rozlišeny zimní povodně za kalendářní měsíce XII-IV (šedou barvou) a letní povodně za měsíce V-XI (bílou barvou).

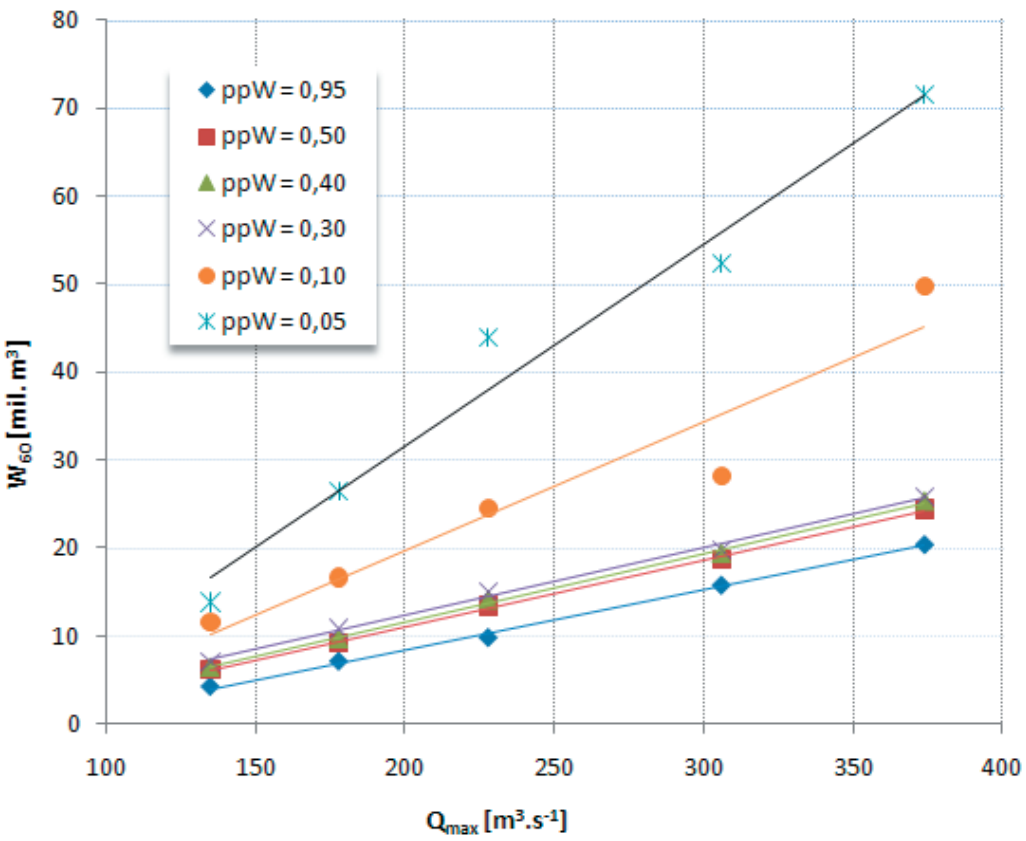


Obr. 1: Syntetické povodně za simulované období 1000 let – zimní (šedá), letní (bílá), historické a teoretické dle ČHMÚ (černá).

Z grafu na Obr. 1 zřejmě vyplývá rozdílný charakter zimních a letních povodní, kdy letní povodně se vyznačují menším objemem. Zimní povodně způsobené často táním sněhových zásob jsou naopak typické většími objemy. Do grafu jsou dále zaznačeny historické povodně z roku 2002 a 2006. Povodeň v srpnu roku 2002 měla dvě vlny. První vlna byla způsobena vydatnými srážkami, které vypadly na relativně suché povodí, a její objem odpovídá typické letní povodni při dané kulminaci. Naopak druhá vlna povodně 2002 byla způsobena opakovanými vydatnými srážkami, které však tentokrát vypadly na nasycené povodí po průchodu první vlny. Objem druhé vlny 2002 je z tohoto důvodu v kontextu letních povodní silně nadprůměrný. V grafu jsou zároveň vyznačeny teoretické povodňové vlny (TPV) zpracované ČHMÚ, které byly využity v rámci studie zvýšení retence VD Lipno (VD TBD, 2004). Z grafu vizuálně vyplývá, že uvedené TPV dobře reprezentují celkovou variabilitu všech pravděpodobných povodní. Alternativně by bylo možné vyhodnotit zvláštní TPV pro zimní a letní období.

Pro odvozování hydrogramů teoretických povodňových vln je velmi užitečný koncept podmíněných pravděpodobností kulminačních průtoků a objemů povodňových vln. Analýza byla nejprve odvozena zpracováním empirických podmíněných pravděpodobností na podkladě 1000leté kontinuální simulace. Objemy povodňových vln byly variantně voleny nad neškodným odtokem 60, resp. 90 $m^3.s^{-1}$ (soubor W_{60}, resp. W_{90}). Postup byl založen na myšlence vytvoření pěti dílčích souborů objemů povodní s kulminacemi Q_5, Q_{10}, Q_{20},Q_{50} a Q_{100} s tolerancí ±10 %. Tyto soubory byly následně proloženy vhodným typem rozdělení pravděpodobnosti (GEV) a byly odhadnuty jejich charakteristické kvantily.

Výsledek analýzy pro soubor W_{60} je znázorněn v Obr. 2. Hodnoty podmíněných pravděpodobností překročení objemů *ppW* byly voleny od 0,95 do 0,05. Z grafů vyplývá, že jednotlivé charakteristické kvantily je možné proložit lineární závislostí. Dále je zřejmé, že rozptyl pravděpodobných objemů povodňových vln pro dané hodnoty kulminačních průtoků je poměrně značný.



Obr. 2: Podmíněné pravděpodobnosti překročení objemů povodňových vln *ppW* (nad $O_{ne,1}$ = 60 $m^3.s^{-1}$) v závislosti na době opakování kulminace.

5. Závěr

Využití stochastického generátoru srážek v teorii nádrží a vodohospodářských soustav nabízí ve srovnání se současným stavem řešení problematiky tyto nové poznatky:

1. Nároky na retenční funkci nádrží,během povodní jsou dány dány souborem více charakteristik povodňového režimu a jejich nejrůznějších kombinací. Jedná se zejména o kulminační průtok povodně, objem povodňové vlny a dobu trvání povodně. V práci je popsán původní metodický postup pro zpracování vícerozměrné frekvenční analýzy povodňového režimu za využití kontinuální simulace. Výhodou postupu je skutečnost, že nevyžaduje rozsáhlé historické pozorování průtoků v zájmovém profilu. Pro potřeby odhadu sdružených distribučních funkcí je využita progresivní metoda Copulí.
2. Aplikace generátoru srážek ve spojení s kontinuální simulací srážko-odtokového procesu může sloužit pro hodnocení spolehlivosti retenční funkce nádrží.
3. Metodika může dále sloužit pro konstrukci předpovědních a varovných systémů, popř. pro potřeby optimalizace řízení vodohospodářských soustav za povodní.

Poděkování

Příspěvek byl zpracován za podpory grantového projektu GA ČR reg. č.: 103/07/1620 s názvem „Predikční a simulační modely v teorii operativního řízení vodohospodářských soustav“.

Literatura

[1] BLAŽKOVÁ, Š. – BEVEN, K. J., 1997. Flood Frequency Prediction for data limited catchments in Czech Republic using stochastic rainfall model and TOPMODEL. Journal of Hydrology 195, s. 256-278. ISSN 0022-1694.

[2] FOŠUMPAUR, P., 2009. Využití generátoru srážek v teorii nádrží a vodohospodářských soustav. [Habilitační práce]. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. 92 s.

[3] OLSSON, J., 1998. Evaluation of a scaling cascade model for temporal rainfall disaggregation. Hydrology and Earth System Sciences, 2(1), s. 19-30. ISSN: 1027-5606.

[4] RICHARDSON, C.W., 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. Water Resources Research 17, pp 182-190. ISSN 0043–1397.

[5] SKLAR, A., 1959. Fonction de re´partition a` n dimensions et leurs marges. Publications de L´Institute de Statistique, Universite´ de Paris 8, p. 229-231.

[6] WILKS, D. S., – WILBY, R. L., 1999. The weather generation game: a review of stochastic weather model. Progress in Physical Geography 23, 3. ISSN: 0309-1333.

[7] ZEZULÁK, J., – KREJČÍ, J., 2005. AQUALOG, Hydrologický model. Aqualogic Consulting, s.r.o., Praha.

Kontakty na autora

1 ČVUT v Praze, Fakulta stavební, e-mail: fosumpaur@fsv.cvut.cz