ZPŘESNĚNÍ METOD PRO ODVOZOVÁNÍ KŘIVEK PŘEKROČENÍ M-DENNÍCH PRŮTOKŮ V NEPOZOROVANÝCH PROFILECH S VYUŽITÍM GIS

Ladislav Budík[1]

Abstrakt

Základem nového inovovaného metodického postupu pro odvozování M-denních průtoků v nepozorovaných profilech je původní metodický postup používaný v ČHMÚ a publikovaný v literatuře [2]. Pro odvození M-denních průtoků za nové referenční období bylo použito teoretické logaritmicko-normální pětiparametrické rozdělení LN5, viz [1]. Při jeho použití se dosáhne nižší (cca poloviční) průměrné procentuální chyby proložení (MAPE) ve srovnání s dosud používaným rozdělením LN3, viz [2]. Skládání křivek překročení jednotlivých povodí se provádí numericky podle nově vytvořeného vzorce, přičemž pro koeficient korelace řad je použit vzorec odvozený pomocí regrese. K výpočtu je přidána paušální transformace velikosti průtoku po toku, která je závislá na komunikaci s nivou a říčním korytem. Parametry teoretického rozdělení LN5 se odvozují regresními rovnicemi, které jsou sestaveny na základě fyzicko-geografických a geologicko-hydrologických parametrů povodí z GIS. Způsob výpočtu umožňuje počítat neovlivněné i ovlivněné M-denní průtoky (lidskou činností). Po zadání GIS parametrů povodí a parametrů stanic ohraničujících mezipovodí je výpočet víceméně automatizován. Způsob výpočtu M-denních průtoků je sestaven tak, že lze počítat M-denní průtoky i po jednotlivých desetiletích.

Klíčová slova: M-denní průtoky, nepozorované profily, teoretické logaritmicko-normální pětiparametrické rozdělení LN5, ovlivněné a neovlivněné průtoky

1. Úvod

ČHMÚ dlouhá léta používá k odvozování M-denních průtoků v nepozorovaných profilech tzv. Katastr, odvozený z období 1931-1980 (dále jen Katastr 31- 80). Postup je popsán v publikaci [2]. Tento způsob výpočtu nahrazoval dřívější metodu odvození s pomocí analogonů (podobných povodí). Katastr 31- 80 byl založen na proložení empirické křivky překročení M-denních průtoků teoretickým logaritmicko-normálním tříparametrickým rozdělením LN3. Tento příspěvek se bude zabývat zdokonalením a zpřesněním tohoto postupu za použití teoretického logaritmicko-normálního pětiparametrického rozdělení LN5 v novém referenčním období.

2. Teoretická křivka překročení průtoků

Pro Katastr 31–80 byla data prokládána teoretickou křivkou LN3. V některých úsecích vodních toků byly poměrně velké odchylky od pozorovaných hodnot - viz Tab. 1. To vedlo ke vzniku nového teoretického rozdělení označeného později LN5, které vychází z teoretického rozdělení LN3 a je schopno k pozorovaným hodnotám přilehnout lépe.

Rozdělení LN3 je transformací normálního rozdělení. To znamená, že odečtením konstanty od dat s rozdělením LN3 a logaritmováním výsledku získáme hodnoty s normálním rozdělením.

Rozdělení LN3 se tedy z normálního rozdělení získá transformací

$$y = e^{x} + y_0 , \qquad (1)$$

kde veličina x se řídí normálním rozdělením a y_0 je konstanta.

Transformace pro rozdělení LN5 je zobecněním transformace normálního rozdělení na LN3 a má následující tvar

$$y = e^{sign(x)\cdot|x|^b + a} + y_0 \,, \tag{2}$$

kde navíc *a* a *b* jsou konstanty. Vztah lze přepsat do tvaru

$$y = e^a e^{sign(x)\cdot|x|^b} + y_0 \,. \tag{3}$$

V rozdělení LN3 přejde tato transformace pro *a*=0 a *b*=1, tedy LN3 je zvláštním případem rozdělení LN5. Dále se budeme již zabývat pouze rozdělením LN5, neboť LN3 bylo dostatečně popsáno a jeho funkce jsou součástí Katastru 31-80.

Rozdíly v přiléhavosti teoretických rozdělení LN3 a LN5 k hydrologickým datům jsou dostatečně zřejmé z následující tabulky 1.

Tab. 1: Průměrné procentuální chyby (absolutní hodnota) proložení (MAPE) pro vybrané stanice z povodí Moravy a Dyje

Profil (tok)	Plocha povodí (km^2)	LN3	Qa	LN5	Qa
Batelov (Jihlava)	73,5	5,5	5,7	2,5	0,3
Kašava (Dřevnice)	22,7	1,7	1,4	1,4	1,4
Landštejn n. n. (Pstruhovec)	6,3	3,7	0,1	3,7	0,1
Borovnice (Svratka)	128,0	4,4	0,8	1,8	0,6
Luhačovice n.n. (Luhačovický p.)	36,6	5,6	2,0	2,2	1,7
Sloup (Sloupský p.)	50,0	16,8	15,0	3,7	2,4
Chomýž (Rusava)	22,8	5,5	5,7	1,2	1,4
Dolní Bory - Olší (Oslava)	210,9	5,7	1,8	2,6	0.2
Vranov p.n. (Dyje)	2216,1	23,3	3,3	7,7	0,2

3. Doplňování křivek překročení při kratší délce pozorování průtoků

Toto doplnění lze provést s pomocí analogonu (stanice s vyhodnocenými průtoky v rozsahu referenčního období) a přepočtem přes standardizovanou proměnnou pro každý kvantil M-denních průtoků zvlášť. Tento postup je ověřen na pokusně zkracovaných řadách a má poměrně malou chybu.

Oba profily (analogon a stanice s prodlužovanou řadou) se standardizují a provede se LN3 transformace na normální rozdělení s průměrem 0. Zde je velmi důležité určení konstanty y_0 z transformace LN5. Úplné přiblížení k normálnímu rozdělení se samozřejmě nepodaří, protože průtoková data se neřídí přesně rozdělením LN5 a vždy zůstanou různě velké odchylky. Tyto odchylky se vyhodnotí pro jednotlivé vybrané kvantily M-denních průtoků pro oba posuzované profily, přičemž vyhodnocení pro analogon se provede v délce prodlužovaného profilu i v délce cílové. Vyhodnocované kvantity M-denních průtoků musí být pro jednodušší vyhodnocení rozloženy symetricky kolem mediánu.

U stanice (analogon) vyhodnotíme rozdíly mezi transformovanými hodnotami jednotlivých kvantilů M-denních průtoků do normálního rozdělení. Budeme předpokládat, že tyto změny vzhledem k vysokému stupni korelace mezi prodlužovanou řadou a analogonem jsou u prodlužované řady stejné. Potom tento rozdíl (změnu hodnot standardizovaného kvantilu) přičteme k transformovaným kvantilům M-denních průtoků („skoro normální“) u prodlužo-

vaného profilu. Po těchto úpravách získáme zpětnou transformací žádaná prodloužená data M-denních průtoků.

4. Startovací parametry optimalizace

Startovací parametry optimalizace se kvůli přesnosti výpočtu odhadují oproti Katastru 31–80 (plochy cca 50 km^2) na povodích hydrologického seznamu (plochy cca 5 km^2). Lépe se tak rozliší jednotlivá menší povodí jednak vzhledem ke změnám charakteristik daných GIS a dále je to nutné kvůli níže popsané transformaci parametrů LN5 podél toku bez přítoků. V Katastru 31–80 se pro každé větší povodí odvozovala regresní rovnice závislá na srážce nebo byly stanoveny třídy povodí (v počtu sedmi) a pro každou zvlášť byla stanovena závislost parametrů LN3. Tehdy uživatel zadával expertně třídu povodí. V současné době je možno postup automatizovat s pomocí informací z databází a map geologických a fyzicko–geografických charakteristik GIS. S jejich pomocí lze sestavit regresní rovnice pro jednotlivé parametry a poté vypočítat startovací parametry pro jednotlivá nepozorovaná menší povodí mnohem přesněji než jen s pomocí srážky.

Dále jsou uvedeny jako příklad předběžné regresní rovnice (4) až (8) pro jednotlivé parametry LN5. Nejpřesnější je rovnice pro dlouhodobý průměrný specifický průtok q_a.

$$q_a = \left\{ a_1 \cdot P^2 - a_2 \cdot P \cdot ret^{0.5} \cdot \left[\frac{(3000-h)}{3000} \right]^{0.7} - a_3 \cdot \frac{P}{500} \cdot (3000-h)^{0.7} \right\} \cdot (1 + k \cdot P_{dPZV}) \quad (4)$$

$$b = a_1 \cdot h + a_2 \cdot Sl + a_3 \cdot \inf + konst \quad (5)$$

$$\sigma = a_1 \cdot Sl + a_2 \cdot Ll + a_3 \cdot k + a_4 \cdot P + a_5 \cdot \inf + konst \quad (6)$$

$$\mu = a_1 \cdot Sl + a_2 \cdot P^2 + a_3 \cdot k + a_4 \cdot Jl + konst \quad (7)$$

$$q_{100} = a_1 \cdot Hgt + a_2 \cdot P + a_3 \cdot Ll + a_4 \cdot h + konst \quad (8)$$

kde q_a je dlouhodobý specifický odtok, P je dlouhodobá průměrná srážka, *ret* je půdní retence, h nadmořská výška, *Ll, Sl* a *Jl* je podíl listnatého, smíšeného a jehličnatého lesa na povodí, *inf* je půdní infiltrace, H_{gt} hydrologická třída povodí (viz výše), k je koeficient odtoku, P_{dPZV} je hydrogeologická charakteristika. Parametr b je parametr určující sílu exponenciální transformace normálního rozdělení, σ je rozptyl normálního rozdělení, μ je střední hodnota normálního rozdělení, q_{100} je specifický odtok s pravděpodobností překročení 100 %. Parametr a v rozdělení LN5 je určen pomocí q_a.

Parametr q_{100} bude nahrazen parametrem $K_{100\%}$ (teoreticky hodnota y_0 v rovnici (3)), pro který se sestavuje mapa pokrývající celou ČR.

Pro přesnost výpočtu je vzhledem k použití optimalizace důležité, aby vzájemné poměry mezi regresně odhadnutými parametry jednotlivých nepozorovaných povodí byly co nejblíže skutečnosti, protože použitím optimalizačního procesu lze dosáhnout posunu k reálné hodnotě, avšak zůstává zachován vzájemný poměr regresních parametrů nepozorovaných povodí.

5. Princip výpočtu Katastru

Princip zůstává týž jako v současné metodice ČHMÚ, viz [2]. Optimalizace parametrů v nepozorovaných profilech se provádí na parametry ve vodoměrných stanicích. Oproti současné metodice je rozdíl ve způsobu skládání M-denních průtoků v soutokových uzlech a počítání vývoje M-denních průtoků po povodích.

Ze stanic, kde byla k dispozici měřená data nad soutokovým a pod soutokovým uzlem, byl regresí odvozen přibližný vzorec (9) pro stanovení koeficientu korelace *r* v závislosti na ploše povodí *A* ve tvaru

$$r = 1 - \left(A_h + A_p\right) \cdot \frac{0.1}{12000} \ , \tag{9}$$

kde A_h je plocha povodí k hornímu profilu, A_p plocha přítoku nebo mezipovodí. Při ploše povodí 120 000 km^2 vychází koeficient korelace *r* roven nule. Vzorec byl odvozován na plochách povodí do 30 000 km^2.

Transformace M-denních průtoků podél toku bez přítoků byla opět odvozena regresí. Odvozována byla transformace koeficientu variace a 99% průtoku. Z parametrů toku je třeba pro určení této transformace znát navíc délky úseků toku. Odvozené vztahy jsou

$$Cv_d = Cv_h \cdot e^{(\ln 0{,}997063 \cdot (L_h - L_d))} \tag{10}$$

$$K_{99d} = K_{99h} \cdot e^{(\ln 1.008 \cdot (L_h - L_d))} \ , \tag{11}$$

kde Cv_d a Cv_h jsou koeficienty variace dolního a horního profilu mezipovodí, K_{99d} a K_{99h} je poměr 99 % průtoku ku Q_a pro dolní a horní profil, L_h–L_d je délka úseku toku.

Ze vztahů (10) a (11) je odvozen vztah (16) pro transformaci směrodatné proměnné podél toku bez přítoků. S jeho pomocí lze spočítat změnu libovolného průtoku podél říčního toku. Jedná se o přibližný vzorec odvozený z chování toků. Způsob odvození je následující:

Libovolný M-denní průtok lze spočítat jako

$$\mathrm{Q}_M = \mathrm{Q}_a \cdot (1 + t_M \cdot C_v) \tag{12}$$

$$\frac{\mathrm{Q}_M}{\mathrm{Q}_a} = K_M = 1 + t_M \cdot C_v \ , \tag{13}$$

kde Q_a je dlouhodobý průměrný průtok, Q_M je hodnota M-denního průtoku, t_M je směrodatná proměnná, C_v je koeficient variace. Při odvození stačí zjistit poměr, v jakém se mění t_M.C_v, např. při K_{99}. Tuto změnu máme definovanou z předchozích zpracování, viz vztah (11). C_v je konstantní pro všechna K_M (a tedy i Q_M), takže ve vztahu (14) máme definován poměr změny směrodatné proměnné t_M transformací podél toku bez přítoků a mezipovodí.

$$trn = \frac{\mathrm{Q}_{99trn} - \mathrm{Q}_a}{\mathrm{Q}_{99} - \mathrm{Q}_a} \ , \tag{14}$$

kde *trn* je transformační číslo průtoků – poměr t_M.C_v po a před transformací.

Při průtoku právě Q_a je změna transformací nulová, při průtocích větších než Q_a se průtok zmenší, při průtocích menších než Q_a se průtok zvětší. Potom *trn* je rovno

$$trn = \frac{1}{e^{\ln(1.0008) \cdot |dL|}} \ , \tag{15}$$

kde *dL* je délka úseku toku v kilometrech. Tento vztah byl odvozován pro malé toky s průtokem Q_a řádově v jednotkách m^3.s^{-1}. Ze zkušenosti s odvozováním charakteristik průtoků na velkých tocích vyplývá, že tato transformace s rostoucími minimálními průtoky relativně slábne a u toků s minimálními průtoky v desítkách m^3.s^{-1} je zanedbatelná. Tato zkušenost byla vložena do vzorce s pomocí tzv. logistické funkce, která zde má při minimálních průtocích řádově tisíciny m^3.s^{-1} hodnoty prakticky rovné jedné a při minimálních průtocích nad 10 m^3.s^{-1} je prakticky rovna nule. Výsledný vztah potom vypadá takto:

$$trn = 1 - \left[1 - \frac{1}{e^{\ln(1.0008)\cdot|dL|}} \right] \cdot \frac{1}{e^{Q_{\min}}} \tag{16}$$

Při velkých minimálních průtocích je tedy transformační schopnost *trn* zanedbatelná. Možnosti průsaku nivních vod do koryta a obráceně vně koryta jsou zanedbatelné oproti velikosti průtoku tokem.

Protože pro rozdělení LN5 nejsou k dispozici žádné vztahy mezi jednotlivými parametry (pro funkce popisující pravděpodobnostní chování LN5 neumíme najít explicitní vyjádření), je nutno všechny výpočty řešit numericky. Pro skládání křivek v soutokových uzlech byl použit přibližný vztah (17) uvedený v [1]:

$$\mathrm{Q}_d = trn \cdot \left[\max(\mathrm{Q}_p, \mathrm{Q}_h) - \mathrm{Q}_{ah} \right] + \mathrm{Q}_{ah} + r \cdot (\mathrm{Q}_p - \mathrm{Q}_{ap}) + \mathrm{Q}_{ap},$$

když $\dfrac{\min(\mathrm{Q}_p, \mathrm{Q}_h)}{\mathrm{Q}_p} = 1$ a řada Q_h je hlavní tok (17)

$$\mathrm{Q}_d = trn \cdot \left[\max(\mathrm{Q}_p, \mathrm{Q}_h) - \mathrm{Q}_{ap} \right] + \mathrm{Q}_{ap} + r \cdot (\mathrm{Q}_h - \mathrm{Q}_{ah}) + \mathrm{Q}_{ah},$$

kde Q_p je M-denní průtok přítoku nebo mezipovodí, Q_h je M-denní průtok hlavního toku nad soutokem, Q_{ah} je průměrný dlouhodobý průtok hlavního toku nad soutokem, Q_{ap} je průměrný dlouhodobý průtok přítoku.

Vztahy (9), (16) a (17) jsou základními vzorci pro odhad chování křivek překročení průtoků v soutokových uzlech. S pomocí těchto výše popsaných vztahů jsou sestaveny výpočetní tabulky s programy v MS Excelu 2003 pro automatizovaný výpočet.

Po ukončení výpočtu průtoků v nepozorovaných profilech optimalizací je nutno ještě provést korekci průtoků v rámci počítaného úseku s ohledem na rozdíly mezi optimalizovanou hodnotou jednotlivých průtoků závěrového profilu a hodnotou získanou z pozorovaných dat. Musí být splněny bilanční podmínky skládání průtoků v soutokových uzlech (pro větší průtoky než Q_a platí, že hodnota odpovídající určité pravděpodobnosti v profilu pod soutokem je menší než součet odpovídajících hodnot nad soutokem, pro menší průtoky než Q_a je to obráceně).

6. Ovlivnění průtoků

Výrazným problémem zpracování nového Katastru bude řešení ovlivnění průtoků, které je mnohdy docela masivní (Vltava, Jizera, Želivka, Moravice, Ostravice, Jihlava, Dyje atd.). Tuto skutečnost komplikuje nedostatečná přesnost údajů o ovlivnění, které existují v měsíčním kroku až od roku 1979. Naopak výhodou je, že ovlivnění obvykle není příliš variabilní. Výjimkou je ovlivnění provozem přehrad a závlah. U těchto dvou typů ovlivnění se může snadno stát, že po opravě průtoku o hodnotu průměrného měsíčního ovlivnění vychází v toku záporný průtok.

K odvození Katastru M-denních průtoků odovlivněných mohou být v zásadě dva možné přístupy:

1. Jednak mohou být využity odovlivněné měsíční průtoky (uložené v databázi ČHMÚ) získané na základě pozorovaných dat a měsíčních údajů o ovlivnění. Vyskytnou-li se při použití problémy, je třeba je řešit expertně a poté odvodit tzv. „neovlivněný Katastr". „ovlivněný Katastr" by z „neovlivněného" získaného tímto postupem bylo možno spočítat poměrně složitými postupy, které by byly jen velmi obtížně aplikovatelné na celá povodí ČR.

2. Druhou možností je vybrat důležité ovlivňovatele, většinou jsou to větší odběry pro vodárenské účely (bývají to zároveň i převody vody), vypouštění odpadních vod větších

měst, energetika (chlazení), doly, závlahy. Ostatní uživatelé většinou vypouští prakticky odebrané množství o kousek níže po toku a do režimu průtoků zasáhnou jen minimálně. Těmto vybraným ovlivňovatelům potom přisoudit křivku překročení s parametry LN5 (příp. LN3) a koeficient korelace s tokem, z nějž odebírají či do nějž vrací vodu. Tento postup má významnou výhodu oproti předchozímu, že vypočítáme parametry ovlivněného katastru na ovlivněných tocích, ale odtoky mezipovodí a pramenných povodí jsou neovlivněné. Z těchto neovlivněných mezipovodí a pramenných povodí lze potom sestavit „neovlivněný Katastr".

Výstupem zpracování tedy bude „ovlivněný" a „neovlivněný Katastr" v celém rozsahu křivky překročení M-denních průtoků.

7. Závěr

Lze konstatovat, že pro zpracování Katastru M-denních průtoků za nové referenční období je připraven dokonalejší, leč složitější systém než byl použit při minulém hromadném zpracování. To vyplývá i z toho, že se bude nutno vypořádat se složitějšími podmínkami než v předchozím zpracování (např. ovlivnění průtoků). Zároveň jsou k dispozici podstatně širší vstupní podklady (mapy GIS, databáze ovlivnění, apod.). Další výhodou nového způsobu odvození M-denních průtoků je, že ho lze počítat i po jednotlivých desetiletích. Jednotlivá 10letá období lze skládat do libovolných větších celků. Současně všichni zpracovatelé mají k dispozici nesrovnatelně výkonnější počítače s mnohem rozsáhlejšími možnostmi než byly počítače používané v 80. letech 20. století. I to je důvod, proč nelze zůstat u jednodušších a méně přesných výpočtů.

Literatura

[1] BUDÍK L., 2010. M-Day Discharge in an Unobserved Catchments Using Theoretical Probability Distribution LN5, Aplimat International Conference, Bratislava, 2–5 February 2010

[2] KAŠPÁREK, L. – NOVICKÝ, O., 1992. Hydrologická data pro návrhové účely. In: *Světový klimatický program Voda.* ČHMÚ, Praha. 142 s. ISBN 80–901262-1-9.

[3] 20th Conference on the Climate and change. In: *88th AMSAnnual Meeting, LA*, 20–24 January 2008. Dostupné na <www.ametsoc.org/MEET/annual/programsandevents.html>

Kontakty na autora

1 Český Hydrometeorologický Ústav, pobočka Brno, e-mail: budik@chmi.cz