

Klasifikace hydrologických modelů

Studijní materiál pro potřeby posluchačů předmětu „Modelování hydrologických procesů“

Michal Jeníček

*Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, katedra fyzické geografie a geoekologie,
Albertov 6, 128 43 Praha 2, e-mail: michal.jenicek@natur.cuni.cz*

Úvod

Matematická reprezentace srážko-odtokového procesu má dlouhou historii, ale teprve zhruba od 80. let minulého století se díky postupnému rozvoji počítačových technologií stává významným nástrojem hydrologů a vodohospodářů, ať už pro operativní předpověď nebo pro návrhové účely.

Matematický model srážko-odtokového procesu představuje zjednodušený kvantitativní vztah mezi vstupními a výstupními veličinami určitého hydrologického systému (Daňhelka et al., 2003). 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).

Do dnešní doby byla vyvinuta celá řada modelů, které se od sebe odlišují různými přístupy k jednotlivým komponentám srážko-odtokového procesu nebo ke struktuře zkoumaného povodí často v důsledku toho, za jakým účelem a pro jakou oblast byl model vyvíjen. Postupem času se ukázaly podobnosti nebo naopak odlišnosti v jednotlivých pojetích, podle kterých se pak hydrologické modely začlenily do různých kategorií. Klasifikace by měla uživateli pomoci s výběrem vhodného modelu, který je použitelný pro řešení konkrétní problematiky. Zde uvedená klasifikace podle WMO (World Meteorological Organisation) vychází z několika principů (Becker, Serban, 1990):

- účel aplikace modelu
- typ systému, který je simulován
- zohlednění hydrologického procesu, který je modelován
- princip příčiny a důsledku
- míra časové a prostorové diskretizace

Rozdělení dle účelu aplikace

Podle tohoto principu se modely dělí na 3 kategorie:

- modely používané v operativní hydrologii
- modely aplikované pro návrhovou a projekční činnost v oblasti vodního hospodářství
- modely využívané ve výzkumu

V prvním případě se jedná o aplikaci modelu v operativní hydrologii, kdy vstupní data tvoří mimo stavové veličiny také okamžité údaje z automatických meteorologických stanic nebo radarů. Data jsou v tomto případě automaticky předávána modelu a prioritou je rychlost jejich zpracování a převedení na krátkodobou předpověď vodního stavu či průtoku v určitém profilu. V praxi se jedná o více specializovaných modelů (postup povodňové vlny, proudění podzemní vody), který společně s dalšími programovými prostředky (pro sběr a zpracování dat) tvoří předpovědní systém (FFS – Flood Forecast System).

Ve druhém případě jde jednak o dlouhodobější řešení protipovodňové ochrany (např. stavba přehrad, poldrů a další hydrotechnická či hydromeliorační opatření), ale také je použití hydrologických či hydraulických modelů užitečné při řešení nejrůznějších technických staveb od plavebních kanálů, čističek odpadních vod až po mosty. Lze také kupříkladu modelovat srážko-odtokové procesy v povodí pro různé vstupní podmínky.

Pod třetí kategorií využití hydrologického modelu se skrývají možnosti dalšího vývoje modelu, výzkum jednotlivých komponent srážko-odtokového procesu a jejich přesnější popis. Pro tyto účely jsou často zřizována tzv. experimentální povodí s nadstandardní sítí měřících stanic.

V neposlední řadě mohou výstupy z hydrologického modelu sloužit jako vstupní veličiny dalších modelů (například modelů šíření znečištění ve vodním prostředí).

Klasifikace z hlediska typu systému a hydrologického procesu

Podle typu systému lze modely dělit na elementární a komplexní. Přehled jednotlivých typů podle WMO je uveden v tabulce 1:

Tab. 1: Typy hydrologických systémů (Podle WMO in Daňhelka et al., 2003)

Číslo	Typ simulovaného systému	ID
1.	Elementární systém	
1.1	Hydrotop (elementární jednotka s konstantními charakteristikami)	HU
1.2	Méně až středně velké odtokové plochy	SA
1.3	Zvodnělé vrstvy	AQ
1.4	Říční síť	RR
1.5	Nádrže a jezera	RL
2.	Komplexní systémy	
2.1	Systém říčních sítí, nádrží a jezer	CS
2.2	Povodí nebo velké odtokové plochy	CB

Přehled rozdělení modelů podle typu simulovaného procesu je uveden v tabulce 2.

Tab. 2: Hydrologické procesy a související proměnné použité při klasifikaci modelů (Podle WMO in Daňhelka et al., 2003)

Číslo	Hydrologické parametry a procesy	ID
1.	Vlhkost půdy, evapotranspirace	ES
2.	Podzemní voda, hladina, průtok	SG
3.	Průtok a vodní stav v korytě	
3.1	- s časovým krokem <1 den	QF
3.2	- s časovým krokem >1 den	QM
4.	Teplota vody, ledové podmínky a další proměnné	TW
5.	Splaveniny a související parametry	QS
6.	Kvalita vody	WQ

Klasifikace podle stupně kauzality

Podle tohoto kritéria se modely dělí na deterministické a stochastické. Kauzalita je vyjádřena vztahem příčina – důsledek.

Deterministické modely

Modely této kategorie jsou popsány vztahem závislých proměnných (výstupní veličiny) a nezávislých proměnných (vstupní stavové veličiny):

$$y = f(x, a) \quad (1)$$

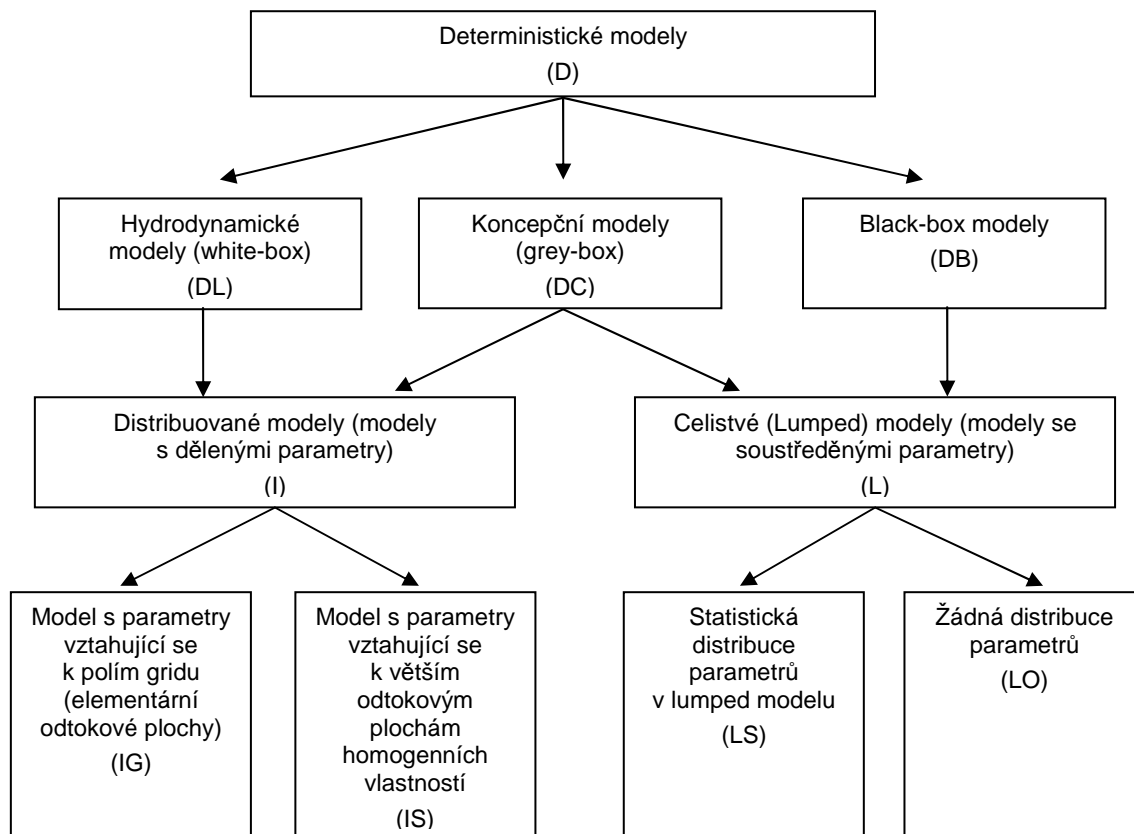
kde a jsou koeficienty nebo parametry popisující chování systému.

Existuje celá řada deterministických modelů, které se od sebe odlišují svojí strukturou, fyzikálním přístupem, či časovou a prostorovou diskretizací. Zde jsou uvedeny hlavní skupiny deterministických modelů (také obr. 1.):

- **DL (Deterministic, Hydrodynamic Laws)** – tyto modely jsou založeny na fyzikálním popisu srážko-odtokového procesu a snaží se respektovat zákony zachování hmoty, hybnosti a energie (Kulhavý, Kovář, 2000). Mohou využívat teoretické poznatky z hydrodynamiky, termodynamiky, chemie, nebo biologie (Daňhelka et al., 2003). Označují se také jako „white-box“ modely.
- **DC (Deterministic, Conceptual)** – tento přístup reflektuje fyzikální zákony ve zjednodušené (konceptní) formě a obsahuje i určitou dávku empiricky odvozených vztahů (Becker, Serban, 1990). Konceptní modely potlačují prostorovou složku a předpokládají, že ke změnám stavových parametrů dochází v určitých reprezentativních bodech (Kulhavý, Kovář, 2000). Původně spojitý systém je tímto prostorově diskretizován. Modely se poté řeší pomocí obyčejných diferenciálních

rovníc. Díky spojení fyzikálního a empirického přístupu je tato skupina označována jako „grey-box“ modely.

- **DB (Deterministic, Black-box)** – modely neberou v úvahu řídicí zákony, ale používají pouze empiricky odvozený vztah mezi vstupními a výstupními veličinami. Procesy probíhající uvnitř systému zůstávají skryty (odtud pojmenování „black-box“). Ukazuje se, že použití těchto modelů pro operativní účely je výhodné spíše u malých povodí, se zvětšující se dobou předpovědi (cca 6 hod) se jeví již výhodnější aplikace fyzikálně strukturovaných koncepčních modelů (Buchtele, 2002). Klasickým příkladem DB modelů jsou neuronové sítě.



Obr. 1: Klasifikace deterministických modelů (podle: Becker, Serban, 1990)

Stochastické modely

Stochastické modely primárně neobsahují vazbu mezi příčinou a důsledkem. Lze je rozdělit do dvou základních skupin (Becker, Serban, 1990):

- **SP (Stochastic Probabilistic)** - pravděpodobnostní modely. 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. Příkladem mohou být ARMA modely (Autoregressive Moving Average).

Z uvedeného vyplývá, že parametry získávané ve stochastických modelech jsou obvykle vztaženy ke konkrétním bodům (stanicím), na kterých jsou měřeny. Již jen v obecnější formě jsou začleňovány do jednotlivých systémů uvedených v tabulce 1. Naproti tomu jsou proměnné v deterministickém přístupu vztahovány k přímo k těmto definovaným systémům.

V praxi se dost často využívá obou přístupů. Stochastická složka je přítomna nejen ve většině modelů v oblasti plánování a projekční činnosti vodohospodářských staveb, ale někdy se využívá i v operativní hydrologii, zejména pro dlouhodobé předpovědi (Daňhelka et al., 2003). Obecně lze ale říci, že deterministický přístup v současnosti převažuje.

V komplexním, deterministickém přístupu lze jen stěží postihnout všechny vstupní parametry a proměnné, které ovlivňují výstupní veličiny. Každý takový model je zatížen určitou chybou, která je složena ze dvou dílčích chyb – vlastní chyba modelu a chyba měřených veličin. Obě je možné popsat určitým pravděpodobnostním rozdělením.

Klasifikace podle míry časové a prostorové diskretizace

Časová diskretizace

Míra časové diskretizace je většinou určována podle způsobu použití modelu. Pro operativní předpovědi, povodňové studie, modelování šíření znečištění nebo transportu plavenin či splavenin 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.

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.

Prostorová diskretizace

Problematika prostorové diskretizace je poněkud složitější. Uživatel výběrem vhodného modelu vlastně vytváří jeho topologii. V zásadě se rozlišují dvě hlavní kategorie – distribuované a celistvé (lumped) modely. V poslední době se také vyčleňuje kategorie modelů semi-distribuovaných.

Celistvé modely

Častěji se označují jako lumped modely. Parametry charakterizující povodí (stavové veličiny i časové řady) jsou vztahovány k celému nebo dílčímu povodí. Protože se většinou jedná o bodově měřené hodnoty (srážky na stanici, průtoky v závěrovém profilu), využívá se nejrůznějších geostatistických metod pro jejich převedení na hodnoty plošné. Příkladem celistvého modelu (též modelu se soustředěnými parametry) je americký model HEC-HMS (Hydrologic Engineering Centre – Hydrologic Modelling System).

Distribuované modely

Označují se také jako modely založené na distribuovaných parametrech. Tento přístup bere v úvahu prostorovou variabilitu vstupních parametrů, které jsou transformovány na parametry výstupní, vykazující také variabilitu v prostoru. V tomto pojetí (které přesněji vystihuje skutečné chování systému) je povodí rozděleno sítí – gridem (čtvercovým nebo i trojúhelníkovým) na elementární odtokové plochy. Pro každé políčko gridu existuje charakteristická hodnota parametru. Velikost gridu bývá různá, maximálně však do jednoho kilometru, aby byla zaručena platnost řídicích rovnic (Becker, Serban, 1990).

Semi-distribuované modely

Princip semi-distribuovaných modelů spočívá v rozdělení povodí na elementární odtokové plochy (hydrotopy), které se (na rozdíl od předchozí kategorie) vyznačují homogenními prostorovými parametry, například stejným půdním druhem a vegetačním pokryvem. Semi-distribuované modely se stále častěji aplikují, protože představují optimální kombinaci obou výše uvedených přístupů. Při určování odtokových ploch semi-distributivních modelů je třeba vzít v úvahu jednak prostorovou distribuci jednotlivých parametrů hydrologického systému (povodí), a také je třeba respektovat rozdělení územních charakteristik ovlivňující odtokový režim jako například topografii, půdní podmínky, vegetační pokryv nebo hydrogeologii.

Seznam literatury

DAŇHELKA, J., KREJČÍ, J., ŠÁLEK, M., ŠERCL, P., ZEZULÁK, J. (2003): *Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR*. ČZÚ, Praha. 214 s.

BECKER, A., SERBAN, P. (1990): *Hydrological models for water – resources system design and operation*. Operational Hydrology Report No. 34, WMO, Geneva. 80 s.

KULHAVÝ, Z., KOVÁŘ, P. (2002): *Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí*. VÚMOP, Praha. 123 s.

CLARKE, R.T. (1973): *Mathematical models in hydrology*. Irrigation and Drainage paper, No. 19, FAO, Rome.

BUCHTELE, J. (2002): *Okolnosti ovlivňující využití modelů a tendence v uplatňování různých přístupů*. In Patera, A. et al.: *Povodně: prognózy, vodní toky a krajina*. ČVUT, Praha. s. 51 – 55.