

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Katedra krajinného managementu



Bakalářská práce

**Zpracování přehledu a popisu epizodních modelů
srážko-odtokových událostí pro odnos látek**

Autor bakalářské práce: Jiří Přeslička

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jana Moravcová, Ph.D.

2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří PŘESLIČKA**
Osobní číslo: **Z09812**
Studijní program: **B4106 Zemědělská specializace**
Studijní obor: **Pozemkové úpravy a převody nemovitostí**
Název tématu: **Zpracování přehledu a popisu epizodních modelů
srážko-odtokových událostí pro odnos látek**
Zadávací katedra: **Katedra krajinného managementu**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Možnosti využití matematických modelů pro odtok a odnos látek.
Kategorizace modelů podle způsobu modelování, plochy a času.
Zpracování detailního přehledu a popisu epizodních modelů.
Vyhodnocení možností využití jednotlivých epizodních modelů.
Zpracování přehledu nejpoužívanějších a nejvhodnějších modelů pro simulace odtoku
a odnosu látek v průběhu srážko-odtokových událostí.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

DAÑHELKA, J. et al. DAÑHELKA, J., KREJČÍ, J., ŠÁLEK, M., ŠERCL, P., ZEZULÁK, J. Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. ČZU Praha. 2003. 196 s.

CLARKE, R. T. Mathematical models in Hydrology. Irrigation and Drainage papers 19. FAO, Rome, 1973.


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

Časopisy Journal of Hydrology, Water Research, Soil and Water Research, Vodní hospodářství

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana MORAVCOVÁ**
Katedra krajinného managementu

Datum zadání bakalářské práce: **14. března 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15. dubna 2012**


prof. Ing. Miloslav Šoch, CSc.
děkan

JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA
studijní oddělení
Studentská 13 ④
370 05 České Budějovice


prof. Ing. Tomáš Kvítek, CSc.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 14. března 2011

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě (v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Zemědělskou fakultou JU) elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích 12. 12. 2012

.....

Jiří Přeslička

Poděkování

Nejprve bych rád poděkoval svým rodičům za trpělivost a duševní i hmotnou podporu během celého studia.

Také děkuji vedoucí mé bakalářské práce Ing. Janě Moravcové, Ph.D. za čas, který mě věnovala během konzultací a za odbornou pomoc při tvorbě této práce.

Na závěr chci poděkovat své sestře Mgr. Pavle Přesličkové za jazykovou korekturu a konzultace při překladu.

ABSTRAKT

V této práci se zabývám tématem matematických hydrologických modelů. Cílem je vysvětlit hlavní principy, na kterých modely pracují, klasifikovat je podle jednotlivých hledisek a zpracovat přehled a popis epizodních modelů. Součástí popisu jsou i možnosti využití jednotlivých modelů, což pomáhá při výběru vhodného modelu pro modelování hydrologických procesů.

KLÍČOVÁ SLOVA

hydrologické modely, epizodní modely, srážko-odtokový proces

ABSTRACT

My thesis deals with the topic of mathematical hydrologic models. Its goal is to explain the main principles, according to which the models work, classify them from individual viewpoints and elaborate an overview and description of event models. The description also contains options for utilizing the individual models. This helps when selecting a suitable model to use for hydrologic process modelling.

KEY WORDS

hydrologic models, event models, rainfall-runoff process

OBSAH

1. Úvod.....	8
2. Hydrologický cyklus	9
2.1 Hydrologická bilance	10
2.2 Srážko-odtokový proces.....	10
3. Modelování hydrologických procesů.....	15
3.1 Historie hydrologického modelování.....	16
3.2 Klasifikace hydrologických modelů	17
3.2.1. Dělení podle rozdělení proměnných	17
3.2.2. Dělení podle způsobu matematické formulace procesu.....	19
3.2.3. Dělení podle linearity.....	22
3.2.4. Dělení podle prostorového rozčlenění vstupních a stavových veličin.....	22
3.2.5. Dělení podle délky období simulace.....	23
3.2.6. Dělení podle velikosti řešeného území	24
3.2.7. Dělení podle účelu aplikace	24
4. Hydrologické modely.....	26
4.1 CN křivky SCS.....	26
4.2 AGNPS.....	27
4.3 EROSION 2D/3D	30
4.4 KINEROS	32
4.5 ANSWERS.....	33
4.6 SMODERP.....	35
4.7 HYDROG – S / HYDROG	37
4.8 CREAMS	40
4.9 WEPP	41
4.10 MIKE-SHE.....	43
4.11 SACRAMENTO (SAC-SMA).....	45
4.12 HEC-HMS.....	46
4.13 KINFIL.....	48
5. Závěr	50
6. Seznam použité literatury.....	51
7. Internetové zdroje a zdroje obrázků.....	56

1. Úvod

Obecně lze říci, že matematický hydrologický model znázorňuje kvantifikovaný vztah mezi stavovými veličinami vstupů a výstupů systému (Daňhelka a kol., 2003). Model odhaduje, jak se konkrétní srážka projeví na celkovém odtoku.

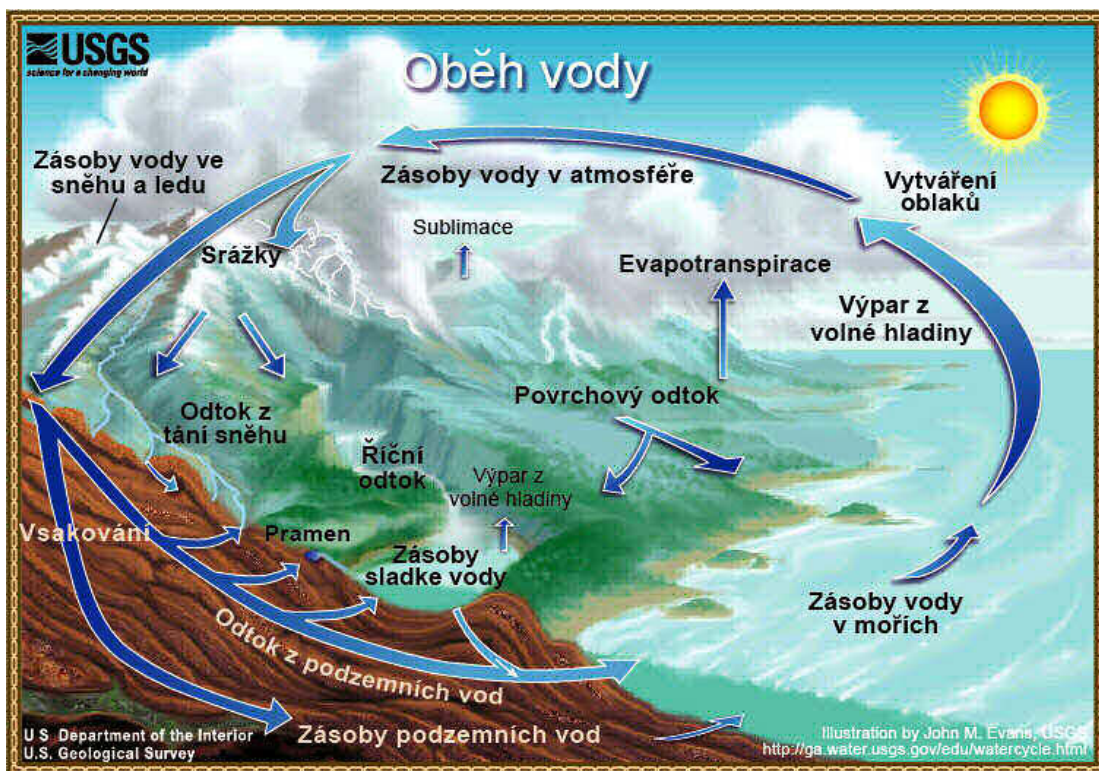
Rozvoj výpočetní techniky a její širší využití v 70. letech byly hlavním faktorem vývoje matematických simulačních metod řešících povrchový odtok. Jedny z prvních modelů vznikaly ještě na analogových počítačích. Z relativně jednoduchých empirických celistvých modelů se vyvíjely modely složité, postavené na fyzikálních základech s distribuovanými vstupními daty. (Daňhelka a kol., 2003)

Matematické modelování nám dává možnost nejenom simulovat konkrétní hydrologický proces, ale také může přibližně předpovědět, jak se bude povodí chovat při vzniku extrémních případů. Epizodní srážko-odtokové modely analyzují významné krátkodobé události skrz přímý odtok (Kulhavý a Kovář, 2000). Výsledky těchto analýz usnadňují práci hydrologů a vodohospodářů při tvorbě operativních předpovědí a v návrhovém procesu.

2. Hydrologický cyklus

Voda pokrývá 70,5% povrchu naší planety. Většina z této masy (97%) je voda slaná obsažená v mořích a oceánech. Sladká voda je pouhým zlomkem z celkového objemu (3%).

V přírodě je voda ve stálém pohybu. Tento pohyb způsobuje zemská gravitace a sluneční energie. Díky zemské gravitaci voda v kapalném a pevném stavu klesá z míst výše položených do míst nižších. Slunce dodává energii potřebnou ke změnám skupenství vody. Při změně z pevných stavů vody do plynných se jedná o sublimaci, z kapalného stavu do plynného jde o vypařování (Krešl, 2001). Objem vypařené vody se odhaduje na 519 000 km³ za rok. Většina vypařené vody pochází z oceánů a moří. Vodní páry jsou vzdušnými proudy přemísťovány a během transportu jistá část zkondenzuje. Takto zkondenzované vodní páry pak dopadají ve formě srážek zpět do oceánů a moří nebo na pevninu. Na pevnině dochází k infiltraci a povrchovému odtoku. Těmito procesy vzniká podzemní voda (infiltrovaná) a voda potoků a řek. Říční sítí se voda vrací zpět do moří a oceánů (Jandora a kol., 2011). Po celou dobu přitom dochází k výpar (z povrchu evaporací a z půdy skrz rostliny transpirací).



Obr. 1 – Hydrologický cyklus.

2.1 Hydrologická bilance

Výše uvedené procesy (výpar, srážky, odtok a infiltrace) se kvantitativně vyjadřují jako tzv. **bilanční prvky** v rámci hydrologické bilance.

V hydrologické bilanci porovnáváme bilanční prvky hydrologického cyklu, které se rozdělují do dvou základních skupin. Jsou to příjmy vody do povodí a ztráty vody z povodí. Díky bilanční rovnici můžeme zjistit, jak velké jsou přírodní zdroje vody a jak je v daném území využít. (Krešl, 2001)

Pro sestavení hydrologické bilance je třeba vyjádřit:

- všechny vstupy reprezentované především srážkami (P)
- všechny výstupy jimiž je evapotranspirace (ET) (složená z evaporace (E) a transpirace (T)) a celkový odtok (Qc)
- také je třeba vyjádřit změnu v zásobách (ΔS)

Základní rovnice hydrologické bilance pro pevniny pak vypadá takto:

$$P - ET - Qc = \Delta S$$

Celkový odtok dělíme na:

- povrchový odtok (Qp)
- podpovrchový (hypodermický) odtok (Qh)
- základní (bazální) odtok (Qb)

2.2 Srážko-odtokový proces

V hydrologickém systému mají nejdůležitější význam srážky v jakémkoliv skupenství. Ty jsou nejen hlavním zdrojem vody vstupující do povodí, ale také způsobují pohyb vody v živých i neživých složkách tohoto systému. Jsou to zejména atmosférické srážky mající rozhodující vliv na množství odtékající vody určitým uzavřeným profilem povodí. Vztah odtoku a srážek je ovlivněn mnoha klimatickými, geografickými a antropogenními faktory. (Starý, 2005)

Činitelé (faktory) ovlivňující srážko-odtokový proces:

- srážky – hlavní faktor
- typy hydrologických půd – ovlivňují rychlost infiltrace, retence a retardace vody
- vegetace – zapříčiňuje intercepci, která může tvořit až 15% srážek; hustota vegetace ovlivňuje rychlost povrchového odtoku a pohlcuje kinetickou energii deště, čímž zabraňuje vzniku eroze
- antropogenní vlivy – změna landuse

Podle Kulhavého a Kováře (2000) můžeme pro zápis srážko-odtokového procesu použít základní bilanční rovnici oběhu vody:

$$P = AES + TQ + \Delta W \quad (\text{mm})$$

P - výška srážek

AES - výška územního výparu

TQ - výška celkového odtoku

ΔW - výška odtokové ztráty, tj. zvýšení nebo snížení zásob povrchové a podpovrchové vody

Základní složky srážko-odtokového procesu

Srážky

Srážky vznikají kondenzací nebo desublimací vodních par. Rozeznáváme:

- **padající (vertikální) srážky** – vznikají kondenzací nebo desublimací v ovzduší (ty pak díky gravitaci padají na zemský povrch)
- **usazené (horizontální) srážky** - vznikají kondenzací nebo desublimací na povrchu krajiny, předmětů a rostlin

Podle skupenství rozlišujeme:

- **srážky kapalné** – déšť, mrholení, mlha, rosa
- **srážky pevné** - sníh, kroupy, námraza, jinovatka, ledovka, náledí

- **srážky smíšené** – tyto srážky můžeme pozorovat při teplotách okolo 0 °C

Podle výšky srážek a jejich trvání rozdělujeme srážky na **běžné** a **extrémní**.

Jak již bylo zmíněno, při studování odtokových poměrů mají důležité postavení srážky (Beven, 2001). Při dopadu na zemský povrch dochází k procesu zvaném intercepce, což je zadržování srážek na povrchu vegetace. Během intercepce se část srážek vypaří. K intercepce dochází do té doby, než je vyčerpána intercepční kapacita. Poté srážky z vegetace stékají a obohacují půdní povrch. Pokud srážky dopadnou na nepropustný povrch, nastává povrchová retence doprovázená následným výparem či přímo dochází k povrchovému odtoku. Část dopadajících srážek se rovněž vsakuje (infiltruje) do půdního profilu (Trizna, 2004).

Infiltrace

Infiltrace je složitý proces ovlivněn mnoha faktory, při kterém voda vstupuje pod zemský povrch. Největší vliv na infiltraci má intenzita srážek a půdní poměry (počáteční vlhkost, obsah vzduchu uzavřeného vsakující se vodou do půdy, stabilizace agregátů a množství pseudoagregátů, objem volných pórů a nekapilární vodivost půdy). Pohyb vody při vsaku probíhá hlavně v nekapilárních pórech, ale dochází také k postupnému pohybu kapilární vody obsažené v půdě před vsakováním. Týká se to především vody obsažené v semikapilárních pórech. Proto zvýšení vlhkosti půdy zmenšuje obecně intenzitu infiltrace. (Krešl, 2001)

Výpar

Výpar vzniká vlivem slunečního záření a skládá se ze dvou částí – evaporace a transpirace. Souhrnně je celkový výpar nazýván jako evapotranspirace (Jandora a kol., 2011). Evaporace je výpar z vodní hladiny a zemského povrchu. Transpirace je definována jako výdej vodní páry z povrchu rostlin a představuje největší část celkového výparu (Krešl, 2001). Vodní pára se pak dostává do atmosféry, kde může být vzdušnými proudy transportována na jiná místa, část par zde kondenzuje a jako srážky v různých formách – déšť, sníh, kroupy, mlha, atd.

dopadají zpět na zemský povrch nebo se podílejí na doplňování vodních ploch a toků (Jandora a kol., 2011).

Odtok

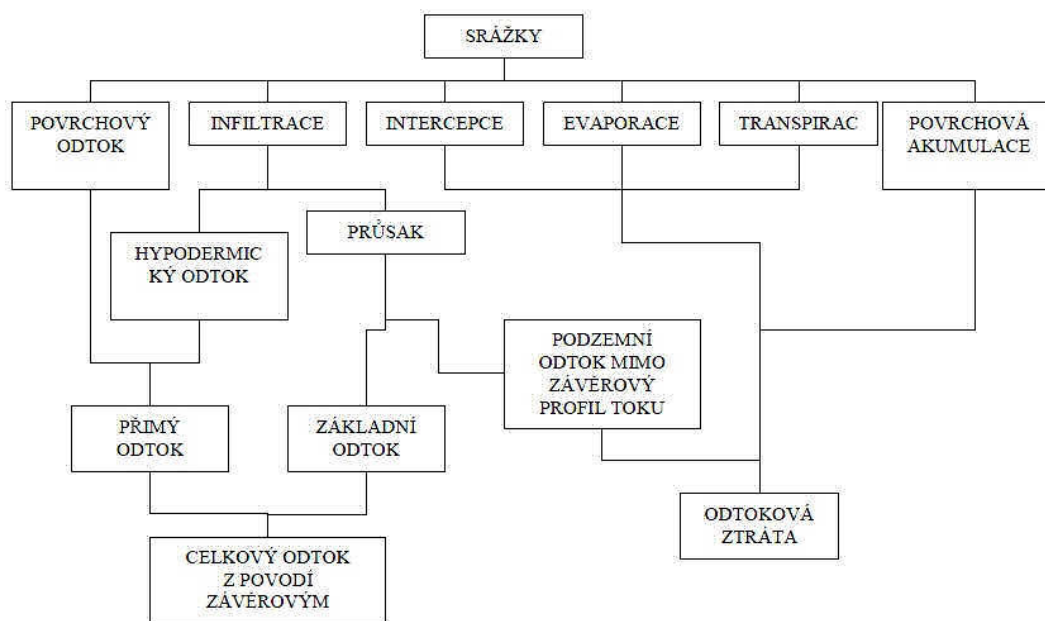
- základní rozdělení odtoku
 - povrchový odtok
 - podpovrchový odtok
 - podzemní odtok

Povrchový odtok nastává, jestliže intenzita infiltrace a povrchové akumulace je nižší než intenzita srážek. Je to nejrychlejší část odtoku a rozdělujeme jej na soustředěný a nesoustředěný. Nejprve nastává **nesoustředěný povrchový odtok**, který má formu souvislé vrstvy. Z této vrstvy přechází voda do brázd, kterými dále odtéká do říční sítě a vytváří **soustředěný povrchový odtok** (Bumerl, 2003). Hlavním zdrojem vody povrchového odtoku jsou srážkové úhrny.

Podpovrchový (hypodermický) odtok bývá ve srovnání s povrchovým odtokem pomalejší. Je tvořen vodou v půdním profilu, která před odtokem z povodí nedosáhla hladiny podzemní vody (Bumerl, 2003). Hlavním zdrojem vody podpovrchového odtoku je infiltrovaná voda.

Podzemní odtok je nejpomalejším odtokem a tvoří ho voda odtékající z povodí ve formě podzemní vody (Bumerl, 2003). Ta je největším zdrojem vody ve vnitrozemí.

Odtok je také možné dělit podle závislosti na průběhu srážkové události na odtok přímý a základní. V průběhu srážkové události a bezprostředně po ní nastává **přímý odtok** a způsobuje zvýšení vodní hladiny, zvětšení průtoků, povodně a s tím spojenou erozi. Skládá se z odtoku povrchového a hypodermického (Kulhavý a Kovář, 2000). Po určité době po konci deště nastává **základní odtok**, který je zdrojem povrchových toků i v době sucha (Bumerl, 2003).

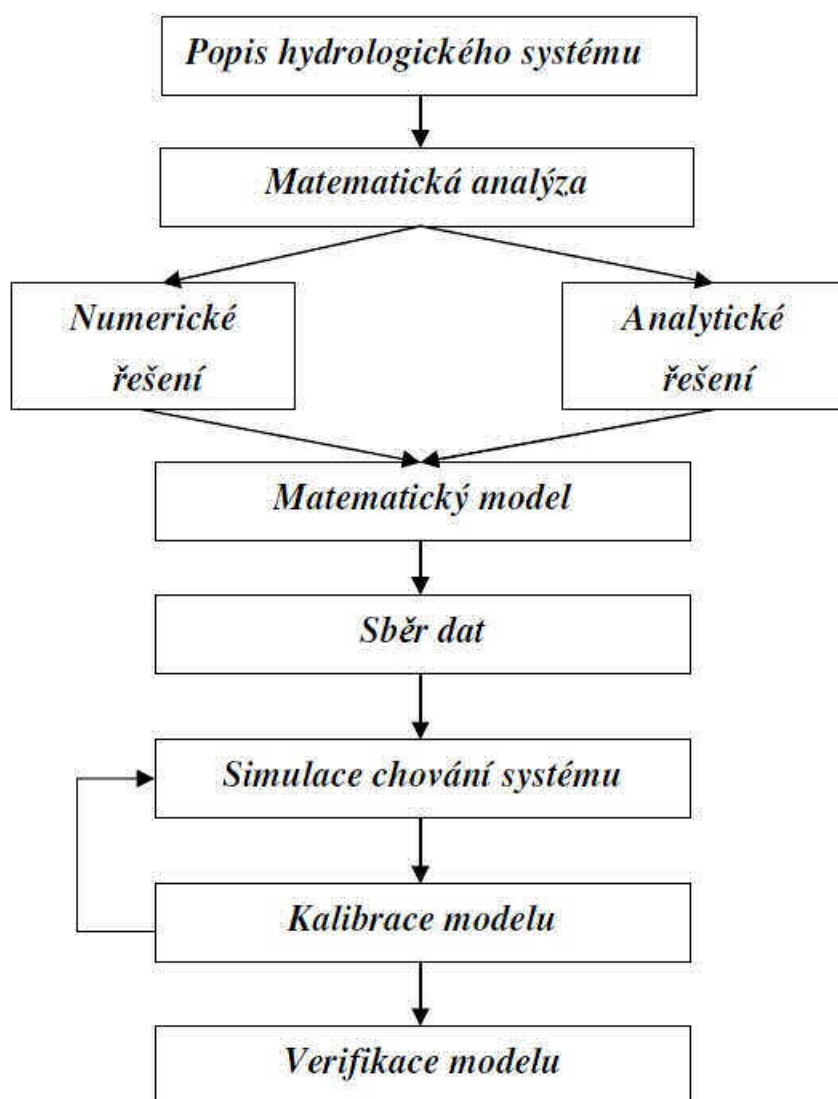


Obr. 2 – Schéma odtokového procesu (podle ČSN 736530 – Názvosloví hydrologie, 1985).

3. Modelování hydrologických procesů

Model představuje určitý objekt nebo spojený systém v prostoru a čase ve zmenšené a zjednodušené formě. Toto zjednodušení nám dává možnost zkoumaný systém nebo proces pochopit, což bychom v jeho původní formě byli jen těžko schopni.

Obecně lze říci, že matematický hydrologický model znázorňuje kvantifikovaný vztah mezi stavovými veličinami vstupů a výstupů systému. (Daňhelka a kol., 2003)



Obr. 3 - Obecné schéma modelovaného systému.

3.1 Historie hydrologického modelování

Todini (1988) uvádí, že srážko-odtokové modelování začalo v druhé polovině 19. století. Jako reakce na tři hlavní technické problémy: projektování městské kanalizace, rekultivace odvodňovacích systémů a projektování nádrží. Hlavním cílem těchto tří pokusů o modelování bylo odhadnout dostatečnou kapacitu zařízení. Mnoho z těchto prvních modelů bylo založeno na empirických rovnicích vytvořených ve specifických podmínkách a aplikováno ve velmi podobném prostředí. Některé modely používaly racionální metodu vytvořenou Mulvaney v roce 1851 k předpovědi odtokových špiček. Mulvaneyho racionální metoda je uváděna jako první srážko-odtokový model. Počátkem 20. století se hydrologové pokusili rozšířit možnost aplikace racionální metody na velká povodí s různorodými srážkami a odlišnými vlastnostmi povodí.

Sherman v roce 1932 představil jednotkový hydrogram (“unitgraph”), který pracuje na principu superpozice a časové invariance. Tento koncept byl v hydrologii zásadní po více než 25let. (Singh a Frevert, 2002)

V 50. letech začali hydrologové vyvíjet konceptuální modely. 60. léta přinesla zavedení počítačů do hydrologického modelování, což umožnilo simulovat složité problémy jako jeden kompletní systém. Prvním podrobným hydrologickým modelem na počítači byl Stanford Watershed Model (SWM) vyvinutý Stanfordskou univerzitou. V roce 1952 začalo Hydrological Engineering Center patřící pod U.S. Army Corps of Engineers provádět rozsáhlý výzkum povodí Missouri a koncem 60. let představila model HEC-1. (Todini, 1988)

Koncem 70. a v průběhu 80. let přicházejí fyzikálně založené modely, které umožňují předpovídat srážko-odtokové události v reálném čase. Hlavním důvodem jejich vytvoření byla potřeba varování v oblastech ohrožených záplavami a potřeba nástroje pro řízení nádrží.

3.2 Klasifikace hydrologických modelů

Hydrologické modely nelze jednoznačně rozdělit, ale můžeme na ně nahlížet z různých úhlů a podle toho také dělit. Jde především o rozdělení podle způsobu matematického vyjádření procesů, podle způsobu schematizace plochy a popisovaných dějů, podle časového a prostorového rámce řešení (Merritt et al., 2003). Hydrologické modely můžeme také rozdělit na srážko-odtokové a hydrodynamické modely. Srážko-odtokové modely se využívají především v operativní hydrologii kdežto hydrodynamickými modely sestavujeme dlouhodobé předpovědi a uplatňují se při výběru místa pro technické stavby na vodním toku a při návrhu protipovodňových opatření. Podle Beckera a Serbana (1990) by mělo rozdělení modelů zjednodušit rozhodování při výběru nejvhodnějšího modelu pro danou oblast a problematiku.

Matematické modely v hydrologii dělíme z několika hledisek a to podle:

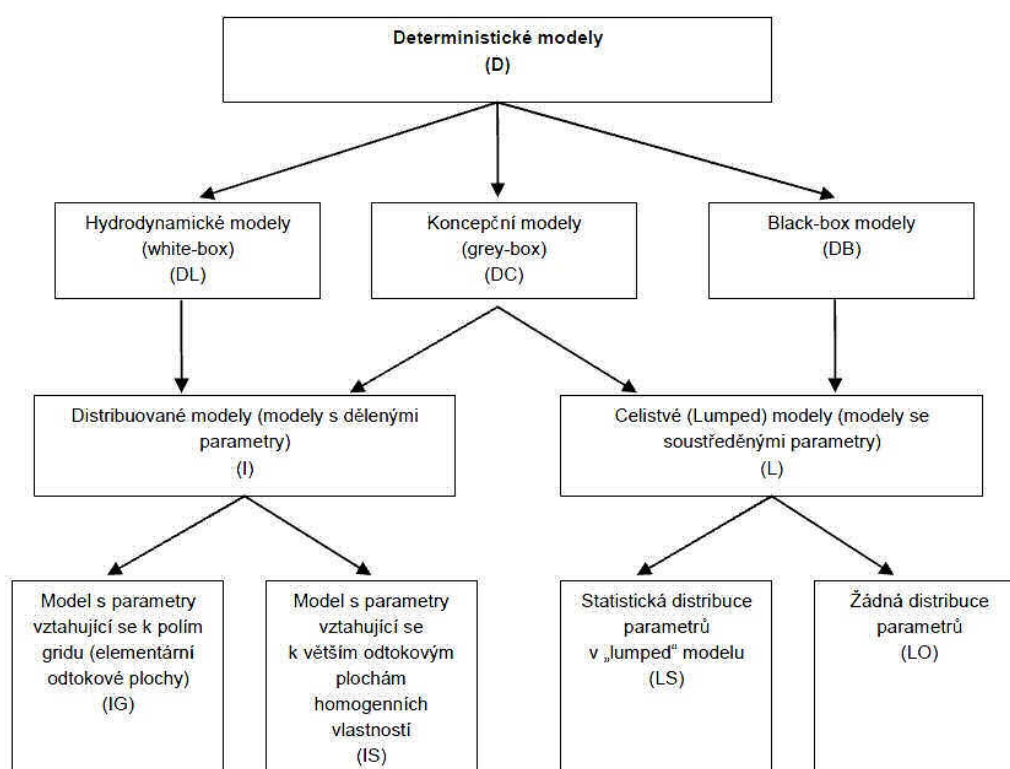
- 1) rozdělení proměnných
- 2) způsobu matematické formulace procesu
- 3) linearity
- 4) prostorového rozčlenění vstupních a stavových veličin
- 5) délky období simulace
- 6) velikosti řešeného území
- 7) účelu aplikace

3.2.1. Dělení podle rozdělení proměnných

Jde o jedno z nejčastěji používaných dělení. Hydrologické procesy, a tím pádem i hydrologické modely, které popisují jejich chování, jsou složeny jak z deterministických, tak ze stochastických prvků. Rozdělení je proto založeno na principu dominance. (Daňhelka, 2007)

Deterministické modely

Jedná se vlastně o rovnici, kde na jedné straně jsou závislé proměnné výstupy a na druhé straně nezávislé proměnné vstupy. Podle Jeníčka (2005) jde tento vztah zapsat rovnicí $y = f(x, a)$, kde a jsou koeficienty nebo parametry popisující chování systému. V aplikované hydrologii mají deterministické modely za úkol pomocí matematických vztahů popsat fyzikální chování celého, nebo jen části hydrologického cyklu (Kovář, 1990). Jsou vždy spojovány s časovými proměnnými, pro které neplatí žádné rozdělení pravděpodobností a jejich vzájemné vztahy jsou ryze příčinné, neboli deterministické (Kulhavý a Kovář, 2000).



Obr. 4 – Klasifikace deterministických modelů (podle Beckera a Serbana, 1990)

Stochastické modely

V případě stochastických modelů neexistuje mezi příčinou a důsledkem žádná vazba. Můžeme je rozdělit na dvě základní skupiny:

Pravděpodobnostní modely

Pravděpodobnostní modely mají jednotlivé hydrologické parametry, jako je maximální či minimální průtok, vodní stavy nebo podzemní odtok, charakterizované pomocí určitého pravděpodobnostního rozdělení (Becker a Serban, 1990).

Generativní modely (generování časových řad)

Tyto modely se mohou využít při extrapolaci časových řad pozorovaných parametrů, přičemž se zachovávají jejich statistické charakteristiky (Becker a Serban, 1990).

3.2.2. Dělení podle způsobu matematické formulace procesu

Kybernetické (empirické, „black-box“ modely)

Modely užívají empiricky odvozené vztahy mezi vstupy a výstupy a nerespektují řídicí zákony (Jeníček, 2005). Díky tomu se také někdy nazývají empirickými modely.

Kybernetické modelování používá metody systémové analýzy, kterými zkoumá, jak se daný systém chová. Strukturu systému kybernetické modelování neřeší, stejně tak jako změny stavových veličin. Proto se kybernetické modely používají u hydrologických systémů s jednoduchou strukturou a jednotným chováním. Proces je řešen pouze z hlediska transformační funkce systému. Funkci chování zjišťujeme ze vztahu mezi vstupními a jim odpovídajícími výstupními daty. Z toho plyne, že aplikace je možná pouze na systémy, kde známe obě dvě zmíněné skupiny dat (Kulhavý a Kovář, 2000). Nejznámější a také asi nejpoužívanější zástupce z řady empirických modelů je USLE (univerzální rovnice ztráty půdy) (Moravcová, 2011) nebo její revidovaná verze RUSLE.

Relativně novým a velice populárním typem mezi empirickými modely jsou modely založené na bázi neuronových sítí. S jejich aplikací v ČR má velké zkušenosti Starý z VUT Brno.

Jedná se o pokročilé statistické řešení, které dokáže aproximovat i velmi nelineární vazby. Nejlepší využití nachází především při aplikaci na procesy, které jsou matematicky těžko popsitelné. Tyto procesy by vyžadovaly velká zjednodušení, což by vedlo ke zkreslení a znehodnocení fyzikálně založeného výpočtu. (Fošumpaur, 1999)

Fyzikálně založené („white-box“ modely)

Základem těchto modelů je fyzikální popis srážko-odtokového procesu a snaha o respektování zákonů zachování hmoty, hybnosti a energie (Kulhavý a Kovář, 2002). Využívají výsledky výzkumu z dalších oborů jako je hydrodynamika, termodynamika, chemie nebo biologie (Daňhelka a kol., 2003). Zásahy uživatele do těchto modelů jsou teoreticky zbytečné a vzhledem ke složitosti i prakticky vyloučené (Daňhelka, 2007). Do skupiny fyzikálně založených modelů patří hlavně „modely hydrodynamické,“ které oproti kybernetickým modelům řeší proces detailněji (Kovář a kol., 2004). Velké nároky na vstupní data a s tím spojená jejich častá nedostupnost je zásadním limitujícím prvkem použití těchto typů modelů (Kulhavý a Kovář, 2000).

Informace potřebné k sestavení a implementaci hydrodynamických modelů:

- přírodní zákony, podle kterých proces probíhá a je popsán formou parciálních diferenciálních rovnic (např. rovnice kontinuity a pohybové)
- geometrický systém (např. čtvercovou nebo trojúhelníkovou síť, atd.) potřebný pro diskretizaci diferenciálních rovnic do rovnic numerických
- numerické schéma umožňující převedení výchozích rovnic do diferenčního tvaru s využitím geometrického systému, uvažovaného v čase i poloze
- potřebné hydrologické a hydraulické proměnné a parametry ve výpočtových bodech geometrické sítě
- počáteční a okrajové podmínky úlohy

Obecný odtokový model obvykle zahrnuje sub-modely tří dominantních procesů:

Procesu "produkce" efektivního deště z příčinného deště, včetně vyjádření příslušných ztrát a distribuce vstupů do obou systémů povrchového a podpovrchového odtoku. Za ztrátu objemu povrchového odtoku může intercepce, evapotranspirace, bezodtokové mikro a makrodeprese a zejména infiltrace.

Procesu "transformace" efektivního deště, mnohdy se zpětnou vazbou s příčinným deštěm pro upřesnění vstupů do obou odtokových systémů.

Procesu "propagace" charakteristik odtoku v časoprostorové oblasti řešení.
(Kovář a kol., 2004)

Koncepční („grey-box“ modely)

Tyto modely jsou založeny především na fyzikálních zákonech, ale obsahují i některé empiricky odvozené vztahy. Fyzikální zákony zde nejsou ve své originální formě, ale jsou zjednodušeny (Becker a Serban, 1990). Zásah uživatele je v tomto případě možný. Podle svých zkušeností upraví model tak, aby nedocházelo ke zkresleným výsledkům (Daňhelka, 2007). Modely předpokládají změny stavových parametrů v určitých reprezentativních bodech, čímž je potlačena prostorová složka (Kulhavý a Kovář, 2000).

Procesy popisované koncepčními modely:

Povrchové procesy - intercepce, evapotranspirace, povrchová retence a akumulace v mikro a makrodepresích, formování povrchového odtoku a svahový odtok (případně další procesy transportního charakteru).

Podpovrchové procesy - infiltrace, půdní odtok, vláhová dynamika, aktivní, nasycené a nenasycené zóny, proudění podzemní vody, tvorba základního odtoku

Korytové procesy - vznik soustředěného odtoku, transformace odtoku v údolnici

3.2.3. Dělení podle linearity

Linearita a nelinearita je obecná kvalitativní vlastnost modelu. Z deterministického pohledu je model lineární, pokud je popsán lineární diferenciální rovnicí (nebo rovnicemi). Uplatňuje se zde princip superpozice a výsledek je závislý jenom na funkci chování systému. Nelineární modely se aplikují na nelineární systémy za použití nelineárních diferenciálních rovnic. Výsledky jsou stejně jako u lineárních modelů závislé na funkci chování systému, ale zde navíc na intenzitě vstupu. (Kulhavý a Kovář, 2000)

Ze stochastického pohledu je model lineární jen v případě, že existují lineární vztahy mezi stavovými veličinami (parametry) (Kulhavý a Kovář, 2000).

3.2.4. Dělení podle prostorového rozčlenění vstupních a stavových veličin

Podle prostorového rozčlenění dělíme modely do dvou základních skupin a to distribuovaných a celistvých (lumped) modelů. Překrýváním těchto dvou skupin vzniká třetí, v poslední době používaná skupina modelů semi-distribuovaných. (Jeníček, 2005)

Celistvé modely

Většinou označované jako lumped modely. Charakteristiky povodí se většinou získávají bodovým měřením (srážky na stanici, průtoky v závěrovém profilu) a poté jsou geostatistickými metodami vypočteny plošné parametry. Ty reprezentují celé nebo dílčí povodí (Jeníček, 2005). Výhodou je jejich jednoduchost a nenáročnost na množství vstupních dat. K zásadním chybám při výpočtu dochází jen zřídka a není obtížné je najít a opravit (Daňhelka, 2007).

Distribuované modely

Tyto modely zohledňují prostorovou nesourodost vstupních dat, a proto jsou někdy označovány jako modely s distribuovanými parametry. Výstupy jsou pak také

prostorově distribuované (Jeníček, 2005). Povodí je rozděleno pravidelnou čtvercovou nebo trojúhelníkovou sítí a toto rozdělení zjednodušuje použití aplikací GIS a dat z DPZ (Moravcová, 2011). Zmíněná síť, rozdělující povodí na elementární odtokové plochy, se často označuje jako grid. Maximální velikost gridu je 1 km². Hodnoty parametrů jsou pro jednotlivé odtokové plochy gridu různé (Jeníček, 2005). Distribuované modely se úspěšně používají na menších povodích, protože jsou technicky velmi náročné (Moravcová, 2011). Spolu s vysokými nároky na množství vstupních dat jde o hlavní nevýhodu těchto modelů.

Semi-distribuované modely

Stejně jako u distribuovaných modelů je i zde povodí rozčleněno na elementární odtokové plochy (hydrotopy) (Jeníček, 2005) s tím rozdílem, že velikost těchto ploch je různá (Moravcová, 2011). Hydrotopy mají homogenní prostorové parametry a podle této homogenity se také určují jejich hranice (Jeníček, 2005). Většinou je to homogenita reliéfu, půdních vlastností a land use (Moravcová, 2011). Jde o kompromis mezi celistvými a distribuovanými modely, který eliminuje jejich nevýhody (Daňhelka, 2007).

3.2.5. Dělení podle délky období simulace

Epizodní

Také jsou nazývány jako diskrétní nebo událostní modely. Využívají se pro modelování význačných srážko-odtokových událostí (Kulhavý a Kovář, 2000), především pro zjištění odtoku a odnosu látek. Díky krátké době simulace není potřeba do výpočtu zahrnovat některé hydrologické a hydrochemické procesy. Proto je náročnost na vstupní data malá (Moravcová, 2011).

Kontinuální modely

Je pro ně typická dlouhá doba simulace, čímž se hodí spíše pro větší povodí. Časový krok u kontinuálních modelů je od dnů a měsíců až po roky (Moravcová, 2011). Při výpočtu používají podmínky a proměnné stanovené z předchozího výpočtu. S ohledem na tento fakt se nejčastěji používá denní časový krok, aby nedošlo

ke zkrácení proměnných (Daňhelka, 2007). Odtokový proces nebo hydrologická bilance je zde oproti epizodním modelům simulována i v jiných než pouze povrchových zónách (Kulhavý a Kovář, 2000). Jsou také označovány jako bilanční modely.

3.2.6. Dělení podle velikosti řešeného území

Matematický model nikdy nedokáže zahrnout všechny probíhající procesy, a to nás nutí k částečnému zjednodušení. Časové a prostorové měřítko ovlivňuje rozsah tohoto zjednodušení a určuje hydrologické jevy zanedbatelné při simulaci. (Beven, 2001)

Dostál (1998) uvádí následující dělení:

Globální - řeší území velkých povodí o velikosti v řádech tisíců km²

Regionální - řeší středně velká povodí s rozlohou desítek až stovek km²

Lokální - řeší zpravidla malá povodí s rozlohou několika km² nebo i jednotlivé části povodí, jako je např. jeden svah

První dva zmíněné přístupy vymezují oblasti s výskytem zrychlené eroze. Dále porovnávají vliv jednotlivých způsobů hospodaření na vznik erozní ohroženosti. Lokální přístup najde své uplatnění v pozemkových úpravách při návrhu protierozních opatření. (Dostál, 1998)

3.2.7. Dělení podle účelu aplikace

Jeníček (2005) uvádí, že podle účelu aplikace můžeme modely rozdělit do tří skupin na modely používané v operativní hydrologii, modely aplikované pro návrhovou a projekční činnost v oblasti vodního hospodářství a modely využívané ve výzkumu

Modely využívané v operativní hydrologii

V operativní hydrologii jsou největší nároky kladeny na rychlost zpracování dat a vytvoření krátkodobé předpovědi vodních stavů či průtoků v určitém profilu.

Vstupní data jsou získávána z automatických meteorologických stanic a radarů. Veškerý přenos dat je automatický.

Modely aplikované pro návrhovou a projektovou činnost v oblasti vodního hospodářství

Modely se používají při projektování řady staveb dlouhodobé protipovodňové ochrany, jako jsou vodní nádrže a poldry. Dále jsou využívány při řešení technických staveb typu čističek odpadních vod, plavebních kanálů nebo mostů.

Modely využívané ve výzkumu

Většinou jsou aplikovány na experimentální povodí s hustou sítí měřicích stanic. Hlavním účelem modelů využívaných ve výzkumu je podrobnější popsání a pochopení jednotlivých částí srážko-odtokového procesu, které umožňuje další vývoj modelu. Cílem je vytvořit model, který co možná nejpřesněji simuluje srážko-odtokové procesy.

4. Hydrologické modely

4.1 CN křivky SCS

Tuto metodu můžeme aplikovat na nepozorovaná povodí. Jejím výsledkem je odhad objemu přímého odtoku ze zkoumaného povodí. Součástí přímého odtoku je odtok povrchový i podpovrchový (hypodermický). Základním a podpovrchovým odtokem většinou není ovlivněna velikost průtokové vlny vzniklé z dešťového přívalu, proto je možné považovat výsledný objem přímého odtoku za shodný s objemem povrchového odtoku. (Janeček a kol., 2002)

Odtoková výška se vypočte podle následujících vztahů:

$$R = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

$$R_1 = 0,2R$$

$$H_o = \frac{(H_s - R)^2}{H_s + R - R_1}$$

R je potenciální maximální retence [mm]

R_1 je retence v bezodtoké fázi [mm]

H_s je srážkový úhrn [mm]

H_o je odtoková výška [mm]

Je-li $R_1 > H_s$, nevzniká přímý odtok a platí $H_o = 0$.

Pro zjištění čísla odtokové křivky (CN křivky) potřebujeme znát hydrologickou skupinu půdy zkoumané oblasti, její využití a vegetační pokryv a také předcházející vlhkost půdy. Metodu CN-křivek vyvinuli v USA, přesněji v Soil Conservation Service a pro půdy ČR byla úspěšně adaptována. (Janeček, 1992)

Jedná se o nejrozšířenější metodu simulace srážko-odtokových procesů a je nejvíce využívána při předpovědi povodní. Jako základ pro modelování slouží digitálním modelu terénu (DMT) povodí. Aplikace této metody je vhodná pro povodí do velikosti 5 km².

Výhodou empirických modelů je jednoduchost použitých vzorců, relativně malý počet vstupních dat i široké zkušenosti s aplikací v různých podmínkách. Nevýhoda spočívá ve velkém zobecnění popisovaných procesů a také fakt, že se jedná o dlouhodobé (kontinuální) odhady a při aplikaci na jednotlivé srážkové epizody jsou výsledky nepřesné. (Dostál, 1998)

4.2 AGNPS

Model vyvinutý US Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USDA-ARS) ve spolupráci s Minnesota Pollution Control Agency and the Soil Conservation Service (SCS) v USA (Young et al., 1989). Model vznikl za účelem předpovědi a analýzy kvality vody odtékající ze zemědělsky využívaného povodí, jehož velikost může být od jednotek až po více než 200 000 hektarů (Merritt et al., 2003). V době vzniku, tedy na začátku 90. let, se jednalo o epizodní, semidistribuovaný, srážko-odtokový model řešící procesy eroze a transportu látek, včetně v tu dobu ojedinělého procesu transportu chemických látek povrchovým odtokem i ve vazbě na sediment (Krása, 2011). Rozvoj v oblasti GIS modelu umožnil přechod na plně distribuovanou verzi. Také vznikla jeho kontinuální podoba AnnAGNPS.

Struktura modelu

Model je složen z více submodelů a každý submodel modeluje určitý hydrologický proces.

Ztrátu půdy model počítá pomocí USLE, objem odtoku a kulminační průtok je odvozen metodou CN – křivek. Upravená Bagnoldova rovnice pro 5 zrnitostních kategorií částic počítá transportní schopnost odtoku. AGNPS je rozsáhlý systém, který vedle hlavního výpočetního modulu obsahuje celou řadu dalších programů, včetně extenze ArcView pro odvození některých hydrologických charakteristik (rozvodnice, říční síť). (Pavlíček, 2011)

Povodí je v AGNPS rozděleno pravidelnou čtvercovou sítí a každá buňka této sítě je brána jako nezávislá hydrologická jednotka, kde jsou řešeny erozní, odtokové a transportní procesy. Výsledky těchto procesů jsou použity jako vstupní data do sousední buňky. Velikost jedné buňky může být od 0,4 do 16 hektarů. (Merritt et al., 2003)

Young (1989) popsal submodely takto:

Hydrologický submodel

Výška přímého odtoku je počítána metodou CN křivek. Výpočet kulminačního průtoku pro každý element pracuje s empirickým vztahem navrženým Smithem a Williamsem.

Erozně transportní submodel

Pomocí RUSLE (revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy) je počítána eroze pro jeden přívalový (návrhový) déšť. Ztráta půdy je stanovena pro každý element povodí. Erodivovaná půda i splaveniny jsou rozděleny do pěti zrnitostních tříd podle velikosti částic: jíl, prach, malé agregáty, velké agregáty a písek. Uvolněné splaveniny jsou dále transportovány mezi elementy do uzávěrového profilu. Transport a ukládání splavenin je definováno vztahy popsány Fosterem a Laneem.

Submodel transportu chemických látek

Tento submodel zjišťuje pohyb dusíku, fosforu a CHSK ve zkoumaném povodí. Transport chemických látek je počítán pro dva druhy látek. Látky vázané na pevné částice a látky ve vodě rozpuštěné. CHSK v odtoku se odhaduje na základě objemu odtoku a jeho průměrné koncentrace CHSK. Z koncentrace CHSK vycházíme při určování koncentrace CHSK v jednotlivých buňkách.

Submodel řešící bodové zdroje znečištění

Jako bodové zdroje znečištění jsou předpokládána místa koncentrace hospodářských zvířat (krmení, ustájení), odkud mohou unikat živiny. Z těchto míst je simulováno uvolnění a transport chemických látek založené na Youngovu modelu znečištění z pastevních areálů koncentrací hospodářských zvířat. Tento model odhaduje množství živin na obou okrajích pastviny a v přitékající vodě. V buňkách obsahujících potenciální bodové zdroje znečištění, jako jsou odtoky z čistíren

odpadních vod, či prameny, se simulace provádí na základě průtoku a koncentrací fosforu a dusíku dané buňky. (Dostál a kol., 2002)

Vstupy

Základem jsou informační vrstvy GIS. Z těch se připravují potřebná vstupní data (Dostál a kol., 2002). Model AGNPS vyžaduje vstupní data pro 22 parametrů a to pro každou buňku zvlášť. Jsou jimi: směr povrchového odtoku, sklonitost a tvar svahu, délka plošného odtoku, hodnota CN křivky, Manningův součinitel drsnosti, faktory K, C, a P z USLE, druh půdy, množství a druh použitých hnojiv a pesticidů, geometrické informace o bodových zdrojích znečištění a eroze, geometrické a drsnostní charakteristiky prvků soustředěného odtoku v buňce). Z toho plyne, že vstupní data budou rozdělena do 22 vrstev. Vstupní data charakterizující povodí obsahují tyto informace: plocha buňky, počet buněk v povodí, úhrn navrhovaného deště a jeho erozní účinnost. (Lenzi a Luzio, 1995)

Pro získání představ o povodí je potřeba několik základních informací. Jsou to vrstvy obsahující hranice pozemků, hranice povodí, tvar hydrografické sítě, lokaci cestní sítě a jiných prvků v povodí, do kterých lze přiřazovat hodnoty charakterizující danou oblast (landuse). Dalším vstupem bez kterého se neobejdeme je digitální model terénu (DMT) a půdní vlastnosti, které se zadávají do vrstvy BPEJ. (Dostál a kol., 2002)

Výstupy

Pro každou buňku v povodí její uzávěrový profil jsou základními výstupy kulminační průtok, výška přímého odtoku, velikost ztráty půdy, množství splavenin, celkové množství a koncentrace ve vodě rozpuštěného a na pevné částice vázaného dusíku a fosforu, CHSK. Také je možné zjistit podrobná data z jednotlivých buněk o přítoku a odtoku transportovaných látek a transportu jednotlivých (pěti) zrnitostních frakcí. (Merritt et al., 2003)

Využití

Model AGNPS se neřadí do skupiny predikčních modelů, ale je vhodný pro zjišťování zdrojových míst eroze a znečištění ve zkoumaném povodí, a to především díky podrobné grafické prezentaci výsledků simulace, kterou poskytuje. Velmi dobře je schopen posoudit jednotlivé způsoby využití území a navrhovaná ochranná opatření. (Dostál a kol., 2002)

4.3 EROSION 2D/3D

Jedná se o fyzikálně založený, plně distribuovaný, epizodní model srážko-odtokových procesů, eroze a transportu sedimentů, který byl vyvinutý v SRN (Krása, 2011). EROSION 2D/3D je model který počítá půdní erozi vyvolanou deštěm a následný transport a ukládání sedimentů na jednom svahu (2D) a malých povodí (3D). Při tvorbě modelu bylo cílem přinést uživatelsky jednoduchý nástroj pro předpověď eroze v hodnocení a plánování ochrany půdy a vod. (Schmidt et al., 1999)

Model obsahuje všechny důležité prvky hydrologického procesu. Výpočet eroze zahrnuje uvolnění částic kinetickou energií deště a povrchoým plošným i soustředěným odtokem. Depozice je určována jednak v ploše povodí, ale také ve vodních tocích. Běžná verze modelu operuje s proměnlivou intenzitou srážky. Simulaci tání sněhu a povrchového odtoku na zmrzlé půdě nabízí až poslední verze modelu. (Krása, 2011)

Vstupy

Často citovanou výhodou modelu Erosion 3D je poměrně omezený počet vstupních parametrů. Obecně je lze rozdělit do tří skupin: parametry popisující **morfologické vlastnosti** simulovaného území, **půdní vlastnosti** a **charakter srážky**. Erosion 3D je extrémně citlivý na vstupní parametry půdy.

Parametry povrchu:

- digitální model terénu (čtvercový rastr)

Parametry půdy:

- objemová hmotnost [kg/m³]
- počáteční půdní vlhkost [obj. %]
- obsah organického uhlíku [hm. %]
- erodibilita [N/m²]
- drsnostní součinitel (podle Manninga) [s/m^{1/3}]
- stav vegetačního pokryvu (přítomnost a stav vegetace) [%]
- zrnitost rozdělená do 9 kategorií (od jílu po hrubé písky podle klasifikace DIN) [%]
- opravný faktor hydraulické vodivosti
- příslušnost ke srážkoměrné stanici

Parametry srážky:

- doba trvání srážky [min]
- intenzita srážky [mm/min]

Výstupy

Výstupem modelu Erosion 3D je celkový objem odtoku, ztráta půdy, koncentrace sedimentu a zrnitost sedimentu (pouze běžná verze, dlouhodobý modul tento výstup nemá). Model tyto parametry počítá pro prvky rastru ovlivněné plošným i soustředěným odtokem. Nová verze modelu je schopna pomocí posloupnosti jednotlivých srážek popsat i dlouhodobou ztrátu půdy z povodí. (Dostál a kol., 2002)

Dalšími užitečnými výstupy jsou přesné určení ploch postižených erozí a ukládáním sedimentu, stanovení bilance eroze/depozice, stanovení množství transportovaného sedimentu z povodí (i z jeho dílčích částí), převod všech dat do GIS. Nadstavbové moduly umožňují simulovat několik srážek za sebou, tání sněhu a infiltraci.

Využití

Výstupní veličiny společně s omezeným počtem vstupních parametrů činí z modelu Erosion 3D velmi slibný nástroj pro simulace srážko-odtokových jevů v povodí. Model EROSION 2D/3D simuluje vliv různých způsobů zemědělského hospodaření

na pozemcích, což umožňuje jeho využití při rozhodování o způsobu využívání půdy nebo případném omezení. Najde uplatnění v modelování zanášení plavebních cest a usazování různých frakcí materiálu kolem objektů. Posuzuje také účinek liniových protierozních opatření (meze, cesty, ...). (Schmidt et al., 1999)

4.4 KINEROS

Jedná se o fyzikálně založený, distribuovaný, epizodní model určený k simulaci jedné bouřkové události. Model vznikl za přispění United States Department of Agriculture. KINEROS je rozšířením modelu KINGEM, který byl vytvořený Rovey v roce 1977. Oproti modelu KINGEM počítá erozi a transport sedimentů (Hafzullah a Kavvas, 2005). Základem tohoto modelu je síť vzájemně propojených kanálků, ploch a záchytných nádrží. Model má několik submodelů, každý zaměřený na jiný proces.

Celkové množství odnosu nerozpuštěných látek vodní erozí je počítán empirickou rovnicí jako ztráta aktuální koncentrace proti maximální koncentraci nerozpuštěných látek v povrchovém toku (Smith et al., 1995). Eroze je rozdělena a počítána ve dvou druzích jako eroze způsobená kinematickou energií deště při dopadu a eroze vzniklá při povrchovém odtoku (Hafzullah a Kavvas, 2005). Sedimenty jsou počítány pro povrchový i soustředěný tok. Základem je jednodimenzionální rovnice kontinuity. (Smith et al., 1995)

Struktura modelu

Studované povodí je rozčleněno do buněk, které reprezentují plochy a kanály, ve kterých je transport vody a sedimentu směřován. Pro každou simulaci může být použito maximálně 60 buněk. To limituje velikost povodí, které může být zkoumáno bez významné aproximace charakteristik povodí. (Hafzullah a Kavvas, 2005)

Skládá se z osmi částí (komponent), jedná se o: srážky, infiltraci, intercepci, povrchový tok, otevřený kanálový tok, eroze, transport sedimentů a sedimentace.

Vstupy

Pro fyzikální popis povodí je potřeba pět vstupních kategorií. Jsou to simulované srážkové informace, topografie povodí, charakteristika kanálů, povrchový pokryv a půdní vlastnosti.

Výstupy

Model KINEROS poskytuje jako výstup následující data: odtok z povodí, vrchol odtokové rychlosti, eroze, ztráta půdy z jednotlivých bouřkových událostí, výpočet sedimentů, infiltrace a intercepce.

4.5 ANSWERS

Model vznikl v 70. letech na Univerzitě Purdue ve West Lafayette v Indianě a stejně jako u AGNPS jde o distribuovaný, epizodní, model, který předpovídá chování povodí během srážkové události a bezprostředně po ní (Fisher et al., 1997). Počáteční vývoj ANSWER se zaměřil na složky eroze a sedimentů, kdežto ve vývoji AGNSP je kladen větší důraz na živiny (Merritt et al., 2003). V modelu ANSWERS jsou hydrologické procesy modelovány koncepčně a erozní procesy fyzikálně (ty zahrnují jak erozi způsobenou deštěm, tak i povrchovou tekoucí vodou). Hodí se spíše na malá povodí.

Struktura modelu

Prostor je rozdělen čtvercovou mřížkou o stejné velikosti čtverců (elementů) a se stejnými hydrologickými znaky. Každý element je samostatnou jednotkou. Jednotky jsou vzájemně svázány tak, že plošný i soustředěný povrchový odtok přecházejí z jednoho elementu do druhého ve směru sklonu svahu. Tento přístup umožňuje zahrnout do úvah vliv nehomogenity půdních a vegetačních poměrů v povodí různého způsobu obhospodařování a vliv nerovnoměrného zasažení deštěm.

Model se skládá ze dvou submodelů. Je to submodel řešící hydrologie a erozní submodel. Hydrologický submodel řeší průtok pomocí Manningovy rovnice a rovnic kontinuity. Pro návrhovou srážku stanoví hydrogram odtoku a objem celkového odtoku v uzávěrovém profilu. Eroze a transport splavenin je počítán pro jednotlivé buňky povodí.

Vstupy

Příprava vstupních dat pro ANSWER je poměrně složitá, jako je tomu v případě většiny fyzikálně založených modelů řešících procesy hydrologické, erozní a procesy transportu sedimentů (Norman, 1989). Model užívá čtyři hlavní kategorie parametrů reliéfu: půda, land use, sklon a popis koryta. Uvnitř těchto hlavních kategorií je požadováno mnoho parametrů. Například pro každý půdní typ je třeba osm veličin. Kategorie land use má šest proměnných. (Fisher et al., 1997)

Výstupy

Hlavními výstupy simulace je eroze a odtok. Model byl rozšířen a nyní je možné počítat i živiny.

Využití

Aplikovatelnost ANSWER je v mnoha povodí limitována rozsáhlými vstupními požadavky na prostorová a časová data. Vzhledem k nedostatku těchto údajů ve většině povodí, mohou parametry vyžadovat kalibraci. Vzniká totiž problém s rozlišením modelu a fyzikálním výkladem parametrů modelu. (Merritt et al., 2003) ANSWER považuje erodovatelnost za relativně časově konstantní parametr, na rozdíl od velkých rozdílů tohoto parametru, které byly zaznamenány. Tento předpoklad pravděpodobně omezí účinnost modelu v předpovědi odtoku a eroze. Podobným problémem trpí mnoho modelů (Govers a Loch, 1993). Model lze považovat za nástroj pro porovnání výsledků různých přístupů a strategií řízení.

4.6 SMODERP

Matematický simulační model SMODERP je pro podmínky ČR a simulace v detailním měřítku nejspíš nejrozšířenější (Vrána a kol., 2001). Jedná se o deterministický, fyzikálně založený, semidistribuovaný, epizodní simulační model (Kadlec a kol., 2011). Počítá erozi, srážko-odtokové procesy a transport sedimentu v rámci pozemku (Krása, 2011). Morfologické, půdní a vegetační poměry území mohou být proměnné (Vrána a kol., 2001). Na autorském webu je volně dostupná jeho základní verze (Krása, 2011).

Model je dlouhodobě vyvíjen na Katedře Hydromeliorací a Krajinného inženýrství (KHMKI) na VUT v Praze. Z měření, které začalo již v roce 1984 vzešla první verze modelu a jeho první matematické odvození navazovalo v roce 1989. Postupem času byl dále vyvíjen a rozšiřován a dnes je využíván i v projekční praxi. (Kavka, 2008)

Struktura modelu

Model se skládá ze dvou základních modulů, kterými jsou hydrologický modul a erozní modul. Hydrologický modul počítá procesy plošného povrchového odtoku. To je infiltrace, povrchové retence a intercepce. Erozní modul počítá uvolnění a transport půdních částic, jak kinetickou energií deště, tak povrchovým odtokem (plošná, rýhová a mezirýhová eroze). Základní principy a koncept modelu vychází z M. Holého. (Holý, 1984)

Vstupy

Pro získání kvalitních výsledků je třeba provést vlastní odběry a fyzikální rozbory. To platí především pro půdní charakteristiky (Krása, 2011).

Základními vstupními daty jsou:

- morfologie terénu (délka, šířka a sklon svahu)
- půdní vlastnosti (půdní druh, součinitel hydraulické vodivosti, sorptivita, drsnost půdního povrchu a jeho retence)

- vegetace (druh vegetace, poměrná listová plocha, potenciální intercepce, Manningův součinitel drsnosti, faktor ochranného vlivu vegetace a způsob obdělávání)
- návrhové srážky (časový průběh deště)

Výstupy

Podle využití modelu máme tři možné druhy výstupů. Výhodou je, že všechny výsledky mají formát *.xls, což zjednodušuje jejich další použití. (Kavka, 2008)

Stanovení charakteristik povrchového odtoku

Výstupem jsou dva listy tabulky. První obsahuje základní charakteristiky povrchového odtoku v závěrovém profilu. Je to maximální výška hladiny [mm], maximální průtok [l/s], celkový objem odtoku [l], maximální rychlost povrchového odtoku [m/s]. Změny těchto hodnot v minutovém intervalu tvoří obsah druhého listu. (Kavka, 2008)

Stanovení erozní ohroženosti pozemku

Porovnáním rychlosti povrchového odtoku a tečného napětí model určí místa přerušení svahu. Výsledky jsou opět shrnuty v tabulce. Jsou zde uvedeny vzdálenosti přerušení od začátku svahu. V tomto přerušení jsou následující hodnoty: délka úseku [m], maximální výška hladiny [mm], maximální průtok [l/s], celkový objem odtoku [l]. (Kavka, 2008)

Posouzení návrhu protierozních opatření

Posuzuje konkrétní protierozní opatření. Do vstupů je v tomto případě nutné zadat ještě parametr délky přerušení svahu (volí uživatel). Výsledkem je vyhovuje nebo nevyhovuje a stejná tabulka jako v předchozím případě. (Kavka, 2008)

Ve výsledcích je obsažena i ztráta půdy.

Využití

Model SMODERP je použitelný pro simulace na pozemcích do 1 km². Model se aplikuje také na větší území než jednotlivé pozemky při řešení problémů, jako je navrhování opatření pro ochranu obcí a pro malá povodí do 10 km².

Pro větší územní celky je použití modelu hlavně u simulace bleskových povodní limitováno nehomogenitou a absencí submodelu řešícího kinematickou vlnu. Model je možné využít hlavně pro posouzení erozní ohroženosti na pozemcích s výpočtem přípustných délek a pro navrhování TPEO a výpočet jejich návrhových hodnot (Kadlec a kol., 2011). SMODERP je též možné použít při posouzení návrhu agrotechnických protierozních opatření, především osevních postupů, ochranných travních pásů a pásového střídání plodin. (Kavka, 2011)

4.7 HYDROG – S / HYDROG

HYDROG – S je systém složený z více modulů. Hlavním modulem je srážko-odtokový model HYDROG. Ve většině publikací se používá pouze označení HYDROG, ve kterém je zahrnut jak programový systém, tak i model samotný.

Hydrog vyvinula firma HySoft. Autorem programu je prof. Ing. Miloš Starý, CSc. a v současnosti je aktuální verze 9.1 (Sovina, 2010). HYDROG je distribuovaný, epizodní, srážko-odtokový model. Používá se pro simulace a v operativních předpovědi a operativním řízení odtoku vody z povodí s nádržemi při povodních. Řeší tedy problémy ve vodohospodářství (Starý, 2005). Předpověď se generuje na 48 hodin.

Struktura modelu

Povodí je schematizované. Nahrazuje ho orientovaný ohodnocený graf. Říční síť se dělí na úseky a k nim příslušející mezipovodí (v programu označované jako "zavěšené plochy"). V mezipovodí je každý úsek a plocha charakterizována několika parametry. Je to délka, průměrný sklon, typ povrchu a další. Parametry, které se k plochám vztahují, jsou považovány za konstantní. (Jeníček, 2011)

Model se skládá ze čtyř submodelů, což jsou: submodel geneze odtoku, sněhový submodel, submodel výpočtu nádrže a submodel půdní vlhkosti.

Submodel geneze odtoku

Povrchový odtok se dělí na plošný odtok z příslušných mezipovodí a koncentrovaný odtok v říční síti (Sovina, 2010). Podzemní odtok se počítá zjednodušenou formou jako poměr k celkovému podzemnímu odtoku v závěrovém profilu (vážen podle ploch dílčích povodí). Celkový podzemní odtok je simulován jako jedna nádrž. Skrz regresní model je počítán jeho časový průběh. Korytové proudění vody vychází ze St. Venantových rovnic metodou kinematické vlny (Kašpárek, 2006). Infiltrace se počítá podle Hortona.

Sněhový submodel

Součástí je i model akumulace a tání sněhové pokrývky typu degree-day (Kašpárek, 2006).

Submodel výpočtu nádrže

Chování vodních děl model simuluje pomocí metody Runge-Kutta IV. řádu (Kašpárek, 2006).

Vstupy

Model vyžaduje podobné vstupy jako ostatní modely. Před použitím modelu je třeba znát počáteční výšky hladin v povodí a velikosti a rozdělení podzemního odtoku (Daňhelka a kol., 2003). Protože se model využívá především v operativní předpovědi, vyžaduje nejvyšší nároky na správnost srážkových vstupních dat. V dílčích povodí předpokládá přívalové srážky stejné intenzity (Starý, 2001). HYDROG také umožňuje použití meteorologických předpovědí modelu ALADIN a radarových odhadů. Kromě srážkových dat vyžaduje časové řady teplot, vodní hodnoty sněhu, přítoky do daného povodí a odtoky z nádrží. (Jeníček, 2011)

Výstupy

Výstupem z programu jsou hydrogramy, tj. graf odtoků z povodí na základě znalosti srážek. Simuluje celkový odtok z povodí z přívalových regionálních srážek a je použitelný pro malá i větší povodí obsahující prvky vodohospodářských soustav.

Využití

Model HYDROG nevyžaduje kontinuální provoz a je možné ho použít pouze při výskytu povodní (Daňhelka a kol., 2003). Spolupracuje s operativní hydrologickou databází AquaBase od Aqualogic s.r.o. Je výhodné tuto databázi používat pro editaci vstupních dat. Systém je možné připojit na automatizovaný přenos ze srážkoměrných stanic a tím v reálném čase generovat předpověď průtoků v kterémkoliv místě povodí (Starý, 2001). Systém HYDROG - S je využíván regionálními pracovišti ČHMÚ v Brně a Ostravě pro povodí Dyje, horní Moravy, Bečvy a Odry. Dále pak dispečerskými pracovišti podniků Povodí Ohře s.p., Povodí Moravy s.p. a Povodí Odry s.p. (Daňhelka a kol., 2003).



Obr. 5 - Využití modelu HYDROG na území spadající pod správu Povodí Moravy s.p.

4.8 CREAMS

Jedná se o fyzikálně založený, deterministický model s empirickým přístupem u některých algoritmů. Zkoumá vliv jednoho deště na transport látek a používá denní časový krok. Model je použitelný na plochy stejných půdních vlastností, shodně využívané, zatížené stejnou srážkou a jako první řeší komplexně hydrologické, erozní a transportní procesy látek (N, P, pesticidů) v povodí. Transportní procesy látek jsou simulovány také pro delší časové období. (Merritt et al., 2003)

Struktura modelu

CREAMS je složen ze tří submodelů, kterými jsou: hydrologický submodel, erozně-sedimentační submodel a chemický submodel.

Hydrologický submodel

Určuje objem povrchového odtoku a maximální odtok, infiltraci, evapotranspiraci a obsah vody v půdě se simulačním krokem jednoho dne. CREAMS je předchůdce vyplavovacího (leaching) modelu GLEAMS (Yoon et al., 1992). U obou modelů je odtok modelován jednoduše a je založen na výpočtu pomocí SCS CN křivek, ale je zde také možnost použití Green-Amptovy infiltrační rovnice (Hafzullah a Kavvas, 2005).

Erozně-sedimentační submodel

Počítá erozi způsobenou kinetickou energií deště a povrchovým odtokem. Vychází přitom z částečně modifikované rovnice USLE. Dále hodnotí erozní proces a množství splavenin, rozdělených podle zrnitostního složení na úpatí svahu. (Merritt et al., 2003)

Chemický submodel

Zkoumá transport a koncentrace pesticidů, dusíku a fosforu. Koncentrace zjišťuje v povrchovém odtoku, v infiltruující vodě a v sedimentech. Také je zde zahrnuta ztráta pesticidů. Model explicitně simuluje transport živin a jejich interakci s plodinami.

Toto je z hlediska chemického submodelu asi jeho největší výhoda. (Merritt et al., 2003)

Vstupy

Náročnost na vstupní data je vysoká.

Využití

Model CREAMS byl vytvořen jako nástroj pro předpověď rozptýlení látek během odtoku. Prostorové použití modelu je omezeno, protože je budován jako model pro jeden svah (field-scale) (Yoon et al., 1992). Rozloha zkoumané oblasti, na kterou je model ještě aplikovatelný závisí na homogenitě území a může být až několik desítek hektarů.

4.9 WEPP

Je to deterministický fyzikálně založený simulační model vyvinutý americkým ministerstvem zemědělství (USDA). Počítá hydrologické, erozní a transportní procesy na jednotlivém svahu (pozemku), v jednoduchém povodí nebo ve složitém nehomogenním povodí (Merritt et al., 2003). Je blízký modelům EPIC, CREAMS a SWRRB. Používá jejich části na různé procesní výpočty. Model WEPP se odlišuje v tom, že je programován speciálně pro počítačové prostředí a nezajímá se tak o statistické vztahy, jako o procesně podložené vyjádření.

Struktura modelu

WEPP vychází ze stochastického generátoru počasí, infiltrační teorie, půdní fyziky, hydrologie atd. Model počítá procesy eroze způsobené kinetickou energií deště, transport povrchovým odtokem v tenké vrstvě, plošnou rýžkovou erozi a rýhovou erozi (Pavlíček, 2011). Erozní submodel využívá k simulaci rovnici kontinuity a rovnice pohybu půdních částic.

Model WEPP se skládá z mnoha komponent, kterými jsou:

- stochastický generátor počasí
- infiltračně-odtoková část - pracuje na bázi upravené Green-Amptovy infiltrační rovnice
- rovnováha půdní vláhly - používá část modelu SWRRB
- vegetační růstu - používá část modelu EPIC
- rozklad rostlinných zbytků
- zavlažování

Vstupy

Model je velice náročný na množství a kvalitu vstupních dat. Většinu dat získává z databází, které jsou součástí modelu.

Výstupy

Základním výstupem je přehled výpočtů odtoku a eroze za každou bouřku, měsíc, rok a také přehled průměrných ročních hodnot. Ve verzi jednoho svahu (pozemku) jsou výstupem odhady prostorového a časového rozložení ztráty půdy, sedimentů (včetně zrnitostního složení) a odtoku. Uložení sedimentů můžeme zjišťovat na všech místech pozemku. (Merritt et al., 2003)

Využití

Model WEPP najde své využití hlavně při simulaci eroze a odnosu látek v malém povodí (Hafzullah a Kavvas, 2005).

4.10 MIKE-SHE

Model, vyvinutý dánskou firmou DHI (Danish Hydraulic Institute), vychází z konceptu modelu SHE – European Hydrologic System. Z celé řady hydrologických modelů od DHI je MIKE-SHE hlavním modelem, s možností rozšíření o další „nadstavbové“ MIKE modely, kterými jsou: MIKE 11, MIKE 21, MIKE FLOOD, MIKE BASIN. MIKE-SHE je postaven na fyzikálních základech. (www.dhi.cz, 2012)

MIKE-SHE je globální, dynamický hydrologický model pro simulace základních procesů v zemní fázi hydrologického cyklu (WWW.DHI.CZ, 2012). MIKE-SHE je koncepční, distribuovaný model, případně semi-distribuovaný model, který je možné použít pro oba časové rámce, jak epizodní, tak kontinuální. Má velký rozsah použitelnosti a dobře spolupracuje s GIS (Jeníček, 2011). MIKE-SHE můžeme aplikovat na plochy v rozmezí jednoho pozemku až po několik povodí. Celková velikost řešné plochy je limitována 80 000 km².

Struktura modelu

Model obsahuje hlavní procesy hydrologického cyklu, jako jsou odtok, eroze, evapotranspirace, intercepce, akumulace a tání sněhu. Sněhové a dešťové srážky vkládáme jako časové řady ze srážkoměrných stanic. Stejně tak je tomu i u evapotranspirace a intercepce. Povrchový odtok z povodí je počítán pomocí 2D metody konečných diferencí šíření vlny. MIKE-SHE zahrnuje několik metod výpočtu od jednoduchého dvouvrstvého modelu, přes gravitační model proudění až po model založený na řešení Richardsovy rovnice. Simulace proudění podzemní vody využívá model MODFLOW, postavený na konečných diferencích. (Jeníček, 2011)

Vstupy

Požadována jsou obdobná vstupní data jako u většiny modelů zkoumajících procesy hydrologického cyklu.

Nezbytnými vstupy jsou data charakterizující:

- simulační plochu – nejčastěji ve formě polygonu
- topografii – jako bodová nebo mřížková data
- srážky – naměřené hodnoty

Dalšími daty, která Mike SHE nejčastěji vyžaduje vzhledem k modelovaným hydrologickým procesům, jsou:

- referenční evapotranspirace – staniční data nebo výpočty z meteorologických dat
- teplota vzduchu – pro výpočet tání sněhu
- solární radiace – pro výpočet tání sněhu
- vymezení dílčích povodí – pro rozdělení odtoku v povodí
- říční síť – směrové řešení a příčné řezy pro výpočet soustředěného odtoku
- landuse – využití území pro výpočet odtoku
- půdní poměry – pro výpočet infiltrace a odtoku
- geologie – pro výpočet podpovrchového odtoku

Výstupy

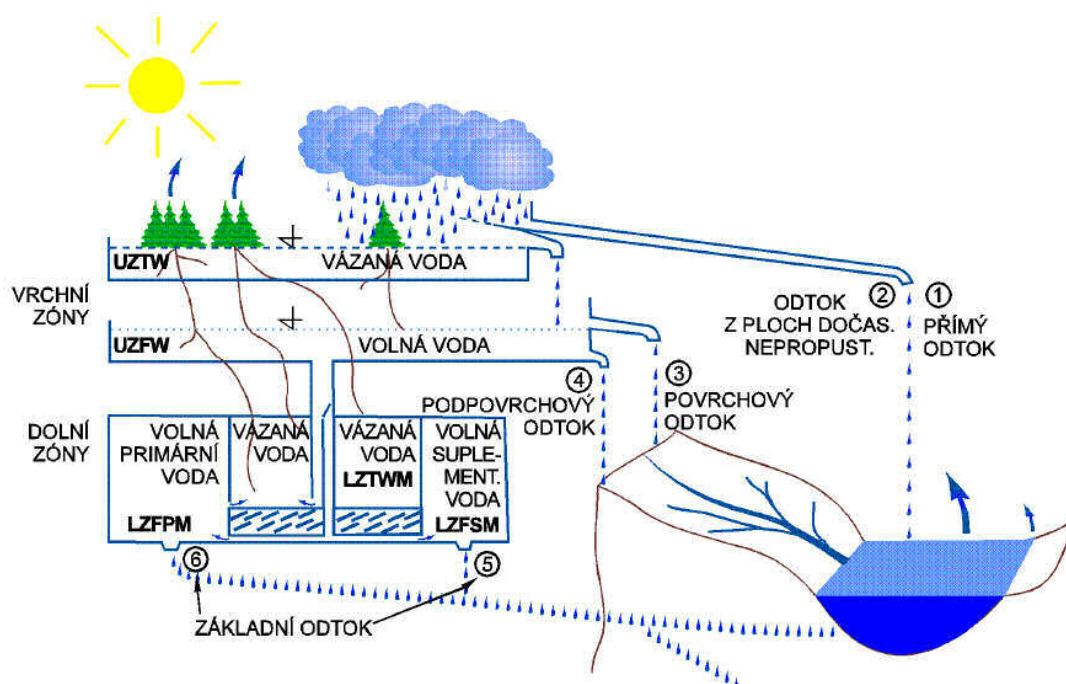
MIKE-SHE je schopen zobrazit velké množství výstupních dat. Seznam výstupů záleží na vybraných procesech při specifikaci simulace.

Využití

Model je vhodný pro analýzu, plánování a řízení v oblasti vodních zdrojů, povodí a životního prostředí, model má širokou oblast uplatnění při posuzování vzájemných interakcí mezi povrchovou a podzemní vodou a při řešení zásadních technických zásahů v povodí. (www.dhi.cz, 2012)

4.11 SACRAMENTO (SAC-SMA)

Jedná se o fyzikálně založený, koncepční srážko-odtokový model. Simuluje jak krátkodobé srážkové epizody, tak kontinuální hydrologickou bilanci. Historie modelu sahá do poloviny 70. let, kdy ho v USA začala vyvíjet národní meteorologická služba (NWS). Je také zahrnut v knihovně modelovacích technik NWSRFS (National Weather Service River Forecast System) (Jeníček, 2011). Model SACRAMENTO je poměrně složitý a patří mezi nejznámější modely.



Obr. 6 - Schéma architektury modelu SACRAMENTO.

Struktura modelu

Půdní profil má dvě části a to horní a spodní zónu. Obě zóny obsahují vázanou i volnou vodu, což jsou dvě základní komponenty modelu. Bylo by možné definovat nekonečné množství zón, ale cílem je určit pouze počet, který efektivně popíše fyzikální systém (Daňhelka a kol., 2003). Tyto zóny jsou pak propojeny a vytváří systém nádrží. Nejprve se začne plnit nádrž vázané vody v horní zóně. Poté voda přechází do nádrže volné vody ve stejné zóně a zároveň perkoluje do spodní zóny. Po zaplnění horní zóny (obou nádrží) nastává povrchový. Při zaplnění nádrží vázané

a volné vody v dolní zóně vzniká základní odtok. Hodnotu celkového odtoku získáme sečtením odtoků ze všech zón.

Vstupy

S ohledem na fakt, že se jedná o model půdní vlhkosti jsou nejdůležitější půdní hydrologické charakteristiky jako je obsah pórů, polní kapacita, hydraulická vodivost, apod. (Jeníček, 2011)

Využití

Srážko-odtokový model SACRAMENTO je součástí předpovědního systému Aqualog. Ten je aplikován na povodí Labe a Vltavy, pro které generuje předpovědi. (Jeníček, 2011)

4.12 HEC-HMS

Model HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) je pokračovatelem známého modelu HEC-1, který byl vyvinut během 60. let ženíjním sborem armády USA.

HEC-HMS je celistvý, fyzikálně založený model, avšak některé jeho části mají distribuovanou formu (příkladem výpočet přímého odtoku ModClark nebo upravená metoda CN křivek gridded SCS CN). (Jeníček, 2005)

HEC-HMS, který v sobě zahrnuje i HEC-1 je volně dostupný na <http://www.HEC.usace.army.mil/software/hec-hms/download.html> a to ve verzi pro Windows, Linux a Solaris. Na začátku 90. let se oddělil vývoj komerčního produktu HEC-WMS, který je zaměřen na distribuované řešení simulací a s tím spojené využívání GIS (Jeníček, 2005).

Struktura modelu

Model je složen z několika submodelů. Jsou to:

Submodel počítající objem odtoku

Používá různé metody výpočtu. Metoda SCS CN křivek vychází při počítání objemu odtoku z hydrologických vlastností půdy, jejího landuse a počátečního stavu nasycení. Další metody výpočtu jsou Green-Ampt metoda nebo SMA (Soil Moisture Accounting).

Submodel přímého odtoku

Přímý odtok je počítán jednotkovým hydrogramem. Další možností výpočtu je model kinematické vlny.

Submodel podzemního odtoku

Používá modely lineární nádrže, exponenciálního poklesu a konstantního odtoku.

Submodel korytového odtoku

Obsahuje modely Muskingum-Cunge, Lag a model kinematické vlny. Všechny metody jsou založeny na řešení základních rovnic proudění v otevřených korytech souhrnně nazývány St. Venantovy rovnice.

Další submodely

V případě potřeby je možné simulovat některé speciální případy jako například rozdělovací objekty, nádrže a jiné (Jeníček, 2005).

Vstupy

Vstupní data potřebná k simulaci jsou podobná jako u modelu MIKE-SHE. Srážková data vychází z dat z ombrografů nebo jsou z nich za použití SIS odvozeny plošné srážky. Také jsou využívány radarové odhady srážek. Půdní charakteristiky jsou získávány z databáze půdních typů. Informace o landuse jsou dostupné v Corine Landcover databázi. Tato data slouží k odhadu evapotranspirace a intercepce. (Jeníček, 2005)

Využití

Model je schopen pracovat s povodími o rozloze do 500 km². U větších povodí pak strmě stoupají náklady na přípravu vstupních dat. Model je ideální pro povodí s členitou morfologií, kde není složité určit rozvodnice a pro povodí s malým hypodermickým odtokem a významným odtokem povrchovým. (Merritt et al., 2003)

4.13 KINFIL

Model KINFIL vznikl spojením dvou modelů. Modelu INFIL, který řeší infiltraci a modelu KIN, zaměřeného na transformaci přímého odtoku kinematickou vlnou. Je konstruován na malá povodí, kde odhaduje maximální odtoky z přívalových dešťů. Osvědčil se při řadě simulací povrchového odtoku. Infiltraci KINFIL počítá pomocí Green-Amptovy rovnice (Kovář a Vaššová, 2011). Modelování povrchu povodí zajišťují kaskády až deseti desek (rovinných, obdélníkových i segmentovaných ploch, resp. pomocí kaskády obdélníkových desek s odstupňovanou šířkou) (Kovář a kol., 2004).

Vstupy

Přehled požadovaných vstupů uvedený v manuálu od Kováře a Vaššové (2011).

Část INFIL:

SUBOPT1, 2, 3, 4 logické proměnné (0 nebo 1), Q0 počáteční průtok (m³/s), KT koeficient nasycené hydraulické vodivosti (mm/hod), SO koeficient sorptivity (mm/hod^{0,5}), P celková výška srážky (mm), TD doba trvání deště (hod), CN číslo odtokové křivky (není nutné), N počet pořadnic deště, JJ počet pořadnic hydrogramu, DELT délka časového kroku (hod), RAIN(I) výšky deště v časových krocích - pořadnice hyetogramu (mm), FLAG návěstí zda pokračovat (1), nebo zastavit (0)

Část KIN:

NPL počet soustav desek/segmentu, PP počet desek/segmentu v kaskádě jedné soustavy, SLOPE sklon svahu, LENGTH délka svahu (m), WIDTH šířka

svahu (m), OBST překážka na svahu - relativně v desetinném zlomku záběru, MAN Manningova drsnost n, FRIC hydraulická turbulence (0.6), TYPF typ proudění (1.67), DELT délka časového kroku KIN (s), TDELTA celková doba trvání případu (s), NN počet pořadnic efektivního deště, EFF RAIN(I) pořadnice efektivního deště z části INFIL (mm), FLAG návěstí zda pokračovat (1), nebo zastavit (0)

Využití

Model je možné využít především pro simulaci významných odtokových procesů a návrh průtoků ovlivněných lidskou činností (odlesnění, změna kultur, urbanizace) (Kovář a Vaššová, 2011).

5. Závěr

Srážko-odtokové hydrologické modely jsou v dnešní hydrologii žhavým tématem. S rozvíjející se počítačovou technikou a novými přesnějšími způsoby sběru dat dochází k vývoji celé řady nových modelů. S tím je ovšem spojen problém vhodného výběru modelu pro zvolenou oblast. Při výběru modelu je důležité si uvědomit jaké hydrologické procesy se chystáme modelovat, jaká je velikost zkoumaného území, jaká je dostupnost vstupních dat, jestli máme finanční prostředky pro koupi komerčního softwaru nebo musíme pracovat s volně dostupným modelem, návaznost na GIS a v neposlední řadě osobní zkušenosti s programem. Bez hydrologických modelů si lze dnešní hydrologii asi jen těžko představit.

6. Seznam použité literatury

1. BECKER, A., SERBAN, P. 1990. Hydrological models for water – resources system design and operation. Operational Hydrology Report No. 34. WMO Geneva. 80 p.
2. BEVEN, K. 2001. How far can we go in distributed hydrological modelling? Hydrology and Earth System Sciences 5(1). s. 1 - 12.
3. BUMERL, M. 2003. Hydrologie. Veselí nad Lužnicí. 56 s.
4. 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. ČZU, Praha. 196 s.
5. DAŇHELKA, J. 2007. Operativní hydrologie: hydrologické modely a nejistota předpovědí. Český hydrometeorologický ústav, Praha. 104 s.
6. DOSTÁL, T. 1998. Erozní a transportní procesy v povodí (doktorská disertační práce). ČVUT, Praha. 148 s.
7. DOSTÁL, T., KRÁSA, J., KOLÁČKOVÁ, J., NOVÁKOVÁ, H., NYKL, J., VÁŠKA, J., VRÁNA, K. 2002. Metody odhadu erozní ohroženosti a transportu sedimentu z povodí. Projekt COST OC 623.001 – dílčí zpráva za rok 2002 část: Fakulta stavební ČVUT v Praze. ČVUT Praha. 15 s.
8. FISHER, P., ABRAHART, R., HERBINGER, W. 1997. The sensitivity of two distributed non-point source pollution models to the spatial arrangement of the landscape. Hydrological Processes, 11. pp. 241–252.
9. FOŠUMPAUR, P. 1999. Použití umělých neuronových sítí pro operativní předpovědi říčních průtoků. Vodní hospodářství č. 06.

10. GOVERS, G., LOCH, R. 1993. Effects of initial water content and soil mechanical strength on the runoff erosion resistance of clay soils. *Australian Journal of Soil Research* 31. pp. 549–566.
11. HAFZULLAH, A., KAVVAS, M. 2005. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *CATENA* Volume 64, Issues 2–3. Pages 247-271.
12. HOLÝ, M. 1984. Vztahy mezi povrchovým odtokem a transportem živin v povodí vodárenských nádrží (dílčí zpráva výzkumného úkolu VI – 4 -15 -/01 – 03/). Praha.
13. JANDORA, J., STARA, V., STARÝ, M. 2011. *Hydraulika a hydrologie*. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno. 186 s.
14. JANEČEK, M. 1992. *Ochrana půdy před erozí. Metodika ÚVTIZ č.5*. Praha.
15. JANEČEK, M., BOHUSLÁVEK, J., DUMBROVSKÝ, M., GERGEL, J., HRÁDEK, F., KOVÁŘ, P., KUBÁTOVÁ, E., PASÁK, V., PIVCOVÁ, J., TIPPL, M., TOMAN, F., TOMANOVÁ, O., VÁŠKA, J. 2002. *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. ISV, Praha. 201 s.
16. 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, s. 112-126.
17. JENÍČEK, M. 2011. *Přehled srážko-odtokových modelů*, Studijní materiál pro potřeby posluchačů předmětu „Modelování hydrologických procesů,“ UK Praha, 17 s.
18. KADLEC, V., PROCHÁZKOVÁ, E., DOSTÁL, T., KRÁSA, J., VRÁNA, K., KAVKA, P., ZANDLER, D. 2011. Optimalizace návrhu technických protierozních opatření. *Vodní hospodářství* 6/2011. 242-246.

19. KAŠPÁREK, L. 2006. Vyhodnocení jarní povodně 2006 na území ČR. VÚV T. G. Masaryka, Praha.
20. KAVKA, P. 2008. Simulační model povrchového odtoku a erozních procesů (SMODERP). Juniorstav 2008, 10. odborná konference doktorského studia, sborník anotací. Vysoké učení technické, Brno. 478 s.
21. KAVKA, P. 2011. Kalibrace a validace modelu SMODERP (disertační práce). FS ČVUT. Praha. 126 s.
22. KOVÁŘ, P. 1990. Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích. Vysoká škola zemědělská, Praha. 140 s.
23. KOVÁŘ, P., KUBÁTOVÁ, E., KŘOVÁK, F., STIBINGER, J., KUKLÍK, V. 2004. Simulace scénářů maximálních průtoků se změnou využití pozemků (land use). Výzkumný projekt NAZV 1R44058, Zpráva za rok 2004. Praha. 162 s.
24. KOVÁŘ, P., VAŠŠOVÁ, D. 2011. Model KINFIL Manuál. ČZU Praha. 16 s.
25. KREŠL, J. 2001. Hydrologie. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. Brno. 128 s.
26. KRÁSA, J. 2011. Geoinformatika versus vodohospodářství a krajinné inženýrství: Geoinformatics vs. water and landscape engineering. ČVUT. Praha. 25 s.
27. KULHAVÝ, Z., KOVÁŘ, P. 2000. Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. VÚMOP, Praha. 123 s.
28. LENZI, M. A., Di LUZIO, M. 1995. Surface runoff, soil erosion and water quality modelling in the Alpone watershed using AGNPS integrated with a Geographic Information System. European Journal of Agronomy 6 (1997). s. 1-14.

29. MERRITT, W. S., LETCHER, R. A., JAKEMAN, A. J. 2003. A review of erosion and transport models. *Environmental Modelling and Software* 18. s. 761 - 799.
30. MORAVCOVÁ, J. 2011. Vliv krajinných struktur na vybrané ukazatele jakosti vody při zvýšených průtocích jako podklad pro projekci KPÚ (disertační práce). Katedra krajinného managementu ZF JCU, České Budějovice. 143 s.
31. NORMAN, S.E., 1989. An evaluation of ANSWERS, a distributed parameter watershed model. Thesis submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of master of science in Water Science in the Graduate Division of the University of California. Davis, California.
32. PAVLÍČEK, T. 2011. Modely výpočtu eroze v GIS a jejich porovnání s konkrétní odtokovou událostí na vybraném povodí (disertační práce). Katedra krajinného managementu ZF JCU, České Budějovice. 106 s.
33. SCHMIDT, J., WERNER, M.V., MICHAEL, A. 1999. Application of the EROSION 3D model to the CATSOP watershed, The Netherlands. *CATENA* Volume 37, Issues 3–4. Pages 449-456.
34. SINGH, V.P., FREVERT, D.K. 2002. *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology, Mathematical modeling of watershed hydrology*. Water Resources Publications, LLC. Colorado. 887 p.
35. SMITH, R. E., GOODRICH, D. C., WOOLHISER, D. A., UNKRICH, C. L. 1995. KINEROS – A kinematic runoff and erosion model. In: Singh, V.P. (Ed.) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, Colorado. 697-732.
36. SOVINA, J. 2010. *Simulační modelování vodohospodářských soustav*. ČZU Praha. 100 s.
37. STARÝ, M. 2001. *HYDROG, Software pro simulaci a operativní řízení odtoku z povodí*. HySoft Brno.

38. STARÝ, M. 2005. Hydrologie. VUT Brno. 213 s.
39. TODINI, E. 1988. Rainfall-runoff modelling—past, present, and future. *Journal of Hydrology* 100. p. 341- 352.
40. TRIZNA, M. 2004. Klimageografia a hydrogeografia. 1. vyd. Geo-grafika. Bratislava. 154 s.
41. VRÁNA K., VÁŠKA J., DOSTÁL T., STEHNO D. 2001. SMODERP (Simulační model povrchového odtoku a erozních procesů), WinSMODERP, verze 2.20, Uživatelský manuál. ČVUT v Praze. Praha.
42. YOON, K.S., YOO, K.H., SOILEAU, J.M., TOUCHTON, J.T. 1992. Simulation of sediment and plant nutrient losses by the CREAMS water-quality model. *Water Resources Bulletin* 28. 1013-1021.
43. YOUNG, R. A., ONSTAD, C. A., BOSCH, D. D., ANDERSON, W. P. 1989. AGNPS: A Nonpoint Source Pollution Model for Evaluating Agricultural Watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation* 44. 168-173.

7. Internetové zdroje a zdroje obrázků

DHI [online]. 2012 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z WWW:

<<http://www.dhi.cz/software/river.php>>

Obr. 1 - dostupný na <<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>>

Obr. 2 - Kulhavý, Z., Kovář, P. 2000. Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. VÚMOP Praha.123 s.

Obr. 3 - dostupný na

<http://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/vznik_hydrologickych_pr_edpovedi.htm>

Obr. 4 - Kulhavý, Z., Kovář, P. 2000. Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. VÚMOP Praha.123 s.

Obr. 5 - dostupný na <<http://www.chmi.cz/hydro/pov06/pdf/c52.pdf>>

Obr. 6 - dostupný na <<http://old.chmi.cz/hydro/ohv/aqualog/s-o.html>>