

Optimalizační síťový model vodohospodářských soustav a vodárenských systémů

PETR VYSKOČ, JIŘÍ PICEK

Klíčová slova: vodní zdroje — zásobování vodou — vodohospodářská soustava — software

ABSTRAKT

Článek popisuje programové vybavení zaměřené na analýzu vodohospodářské infrastruktury a určení kritických míst pro zajištění dodávky vody a posouzení možných opatření zaměřených na optimalizaci zásobní funkce vodohospodářské soustavy. Výpočetní postupy integrují vyhodnocení hydrologických charakteristik území, parametrů vodohospodářských a vodárenských soustav a požadavků na zásobování vodou. Řešení využívá teorie grafů a optimalizace toku v síti (aplikován je algoritmus out-of-kilter). Program je realizován formou aplikace pro PC a vybaven uživatelským rozhraním.

ÚVOD

V České republice se, podobně jako jinde ve světě, stále častěji setkáváme s lokálním i regionálním nedostatkem vody. Důvodem jsou jak měnící se nároky (obyvatelstva, průmyslu, energetiky, zemědělství atd.) na zásobování vodou, tak zejména změny dostupnosti vodních zdrojů, způsobené především změnou klimatických podmínek. Možné budoucí negativní dopady sucha lze zmírnit či eliminovat řadou preventivních opatření. Zvažovaná opatření se dosud orientují převážně na zvyšování kapacity vodních zdrojů jako takových, možnosti optimalizace využití těchto zdrojů se však věnuje výrazně menší pozornost. Mezi tato opatření patří rovněž optimalizace zásobní funkce vodohospodářských a vodárenských soustav (VS), včetně jejich propojování či úprav jejich technických parametrů.

Rizika dopadů klimatické změny na vodní zdroje a jejich užívání byla zejména v posledních cca 15 letech předmětem řady výzkumných projektů a studií, na nichž se významnou měrou podílel rovněž Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i. (VÚV TGM). Tyto studie byly zaměřeny především na vyhodnocení možných budoucích rizik při zajištění nároků na zásobování vodou a jako nástroje využívaly převážně metody modelování hydrologické a vodohospodářské bilance, včetně simulačních modelů zásobní funkce vodohospodářských soustav. Potřeba zaměřit se v rizikových lokalitách rovněž na posouzení možných zmírňujících opatření zaměřených na zefektivnění hospodaření s vodními zdroji v tomto kontextu vedla k potřebě doplnění těchto již existujících a využívaných nástrojů o další nástroj zaměřený na optimalizaci parametrů VS a distribuce vody z vodních zdrojů, zejména vodních nádrží, do spotřebišť. Při tvorbě tohoto nástroje bylo využito významné metodické zázemí vytvořené ve VÚV TGM (Václav Zeman, Břetislav Lank a kol.) na přelomu osmdesátých a devadesátých let minulého století, kdy byl navržen a realizován Systém modelů pro navrhování vodohospodářských soustav [1]. Součástí těchto modelů byl i Síťový model vodohospodářské soustavy [2]. Na počátku devadesátých let byl tento model experimentálně ověřován na

pilotním povodí. Tehdejší stav vývoje informačních technologií nicméně jeho aplikaci výrazně omezoval. Podle principů řešení tohoto modelu bylo proto v rámci projektu „Vodohospodářské a vodárenské soustavy a preventivní opatření ke snížení rizik při zásobování pitnou vodou“ (číslo projektu VI20192022159), financovaného Ministerstvem vnitra v rámci Bezpečnostního výzkumu České republiky v letech 2019–2022, vyvinuto programové vybavení „Optimalizační síťový model vodohospodářských soustav a vodárenských systémů“ (systémové označení VSTOOLS.OPTIM). Software je určen k analýze vodohospodářské infrastruktury a určení kritických míst pro zajištění dodávky vody a posouzení možných opatření k optimalizaci zásobní funkce. Aplikace tak funkčně doplňuje stávající nástroje pro řešení dopadů klimatické změny na vodohospodářské soustavy a zásobování vodou o optimalizační prvek.

METODIKA

Realizace programového vybavení optimalizačního síťového modelu je založena na koncepci tzv. „Síťového modelu vodohospodářské soustavy“ definované a podrobně popsané v [2]. Tato koncepce vychází ze systémového pojetí (systém jako množina prvků, které mezi sebou mají určité vzájemné vztahy), z teorie grafů (uzly grafu představují prvky systému a hrany grafu vazby mezi prvky) a metod optimalizace toku sítí. Vodohospodářská soustava je v tomto smyslu tedy uvažována jako množina prvků, jež mají mezi sebou navzájem určité vztahy vytvářející účelový celek.

Systém vodohospodářské soustavy (VS) lze podle [2] popsat takto:

$$VS = [P, k, m, u, t, A, g, d, h, c]$$

kde

- P je množina prvků VS
- k funkce, jež každému prvku p množiny P přiřazuje celé číslo k(p), které je identifikátorem časového období
- m funkce, která každému prvku p množiny P přiřazuje celé číslo m(p), které je identifikátorem subsystému oběhu vody
- u funkce, jež každému prvku p množiny P přiřazuje celé číslo u(p), které je identifikátorem polohy profilů VS
- t funkce, jež každému prvku p množiny P přiřazuje celé číslo t(p), které je identifikátorem typu prvku VS
- A množina aktivit prvků VS
- g zobrazení množiny A do množiny P2, přičemž P2 je množina všech uspořádaných dvojic prvků patřících do P

- d funkce, která každé aktivitě a množiny A přiřazuje kladné reálné číslo $d(a)$ nazývané dolní mez kapacity aktivity (hrany grafu)
- h funkce, jež každé aktivitě a množiny A přiřazuje kladné reálné číslo $h(a)$ nazývané horní mez kapacity aktivity (hrany grafu)
- c funkce, která každé aktivitě z množiny A přiřazuje reálné číslo $c(a)$ nazývané cena aktivity (toky hranou grafu)

Pro aktivity představující vstupní proměnné funkce systému platí $d(a) = h(a)$, pro aktivity představující výstupní proměnné funkce systému platí $d(a) < h(a)$.

Pokud vstupní a výstupní aktivity jsou určeny tak, že k určité volbě vstupních aktivit existuje více než jedno řešení výstupních aktivit, je k úplné identifikaci funkce možno např. stanovit způsob výběru hodnot výstupních aktivit zadaním účelové funkce. Ke každé aktivitě je přiřazeno její „cenné“ ohodnocení $c(a)$.

Způsob výběru řešení je takový, že požadujeme, aby

$$\sum c(a).x(a) = \min$$

kde

- $c(a)$ je „cenné“ ohodnocení aktivity a
- $x(a)$ hodnota toku aktivitou a

Na takto definovaném modelu VS jsou vyhodnoceny optimální hodnoty „aktivit“, resp. oběhu vody. Pro určení optimálního toku sítí model využívá algoritmus out-of-kilter [3].

Model vodohospodářské soustavy vychází z dekompozice systému z hlediska:

- oběhu vody na subsystémy prostředí povrchové vody, podzemní vody a užívání vody a dále typy prvků (např. vodní nádrže), které určují, jaké „aktivity“ tyto prvky vykazují (např. akumulace vody ve vodní nádrži),
- prostoru (prvky VS a průtokové vztahy mezi nimi),
- času (přenos zásob vody z jednoho období do druhého prostřednictvím akumulace vody ve vodních nádržích).

Mezi subsystémy VS a jejich prvky strukturální model rozeznává následující aktivity:

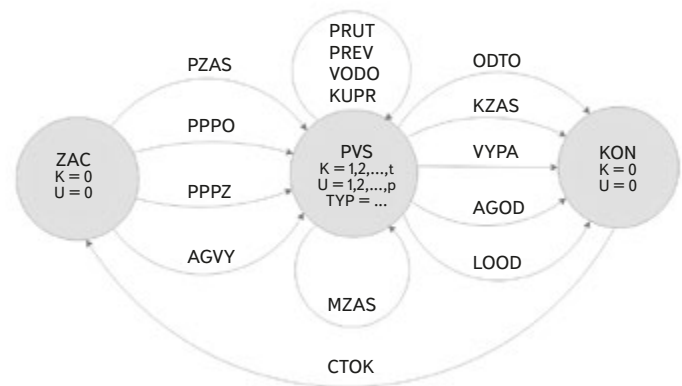
- PZAS počáteční zásoby vody v nádržích
- PPPO přirozené přítoky z mezipovodí
- AGVY agregovaná vypouštění vody (součet vypouštění v mezipovodí)
- PPPZ vydatnost zdroje podzemní vody
- KZAS konečné zásoby vody v nádržích
- LOOD spotřeba vody
- AGOD agregované odběry vody
- VYPA výpary vody
- ODTO odtoky z posledního profilu VS
- OPPZ pro odběr nevyužitá vydatnost zdroje podzemní vody
- PRUT průtok ve vodním toku mezi profily VS
- PREV převod vody mezi profily VS
- VODO vodovod (dopravní cesta v subsystému užívání vody)
- KUPR kapacita úpravy vody
- MZAS mezidobé zásoby vody v nádržích
- CTOK celkový tok vody sítí

Typy prvků VS určují, jakou aktivitu prvek ve struktuře oběhu vody vykazuje. Uvažovány jsou typy:

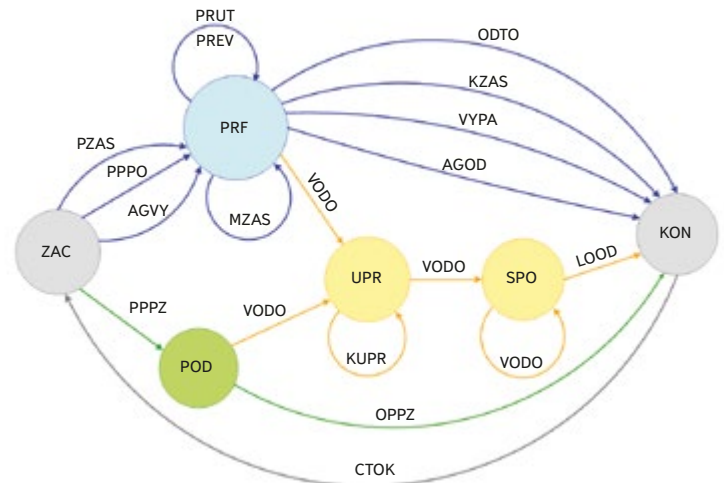
- NAD vodní nádrž
- POV odběr povrchové vody
- POD odběr podzemní vody
- VYP vypouštění do povrchové vody

- BPF bilanční (kontrolní) profil na říční síti
- SPO spotřebiště
- UPR úprava vody
- UZL uzel dopravní cesty (v subsystému užívání vody)

Aktivity prvků VS jsou ilustrovány na obr. 1. ZAC zde představuje počátek systému, PVS prvky VS a KON konec systému. Podrobněji jsou prvky systému znázorněny na obr. 2. PRF tu zastupuje profily na říční síti (vodní nádrže, místa odběrů a vypouštění vody a bilanční profily), POD místa odběru podzemní vody, UPR úpravy vody a SPO spotřebiště. (Prvky a aktivity subsystému povrchové vody jsou zobrazeny modře, subsystému podzemní vody zeleně a subsystému užívání vody žlutě, systémové prvky jsou zobrazeny šedou barvou.)



Obr. 1. Model vodohospodářské soustavy: prvek soustavy a jeho aktivity
Fig. 1. Water management system model: element of the system and its activities



Obr. 2. Model vodohospodářské soustavy: prvky subsystémů povrchové vody, podzemní vody a užívání vody a jejich aktivity
Fig. 2. Water management system model: Elements of the surface water, groundwater and water use subsystems and their activities

Při aplikaci modelu lze zavést následující úpravy:

- Agregace odběrů a vypouštění: Protože konkrétních prvků, zejména odběrů a vypouštění vod, je velké množství a z praktických důvodů není účelné je všechny definovat jako prvky VS, vybírají se jen rozhodující objekty a profily, které reprezentují VS při její funkci. Vliv ostatních prvků je k těmto objektům a profilům souhrnně agregován.

- Stupňování aktivit: Výše uvedené aktivity prvků soustavy je možné pro potřebu požadovaného určení účelové funkce „stupňovat“, tj. rozdělit aktivitu prvku do více hran grafu s rozdílným cenovým ohodnocením. To je typicky účelné např. u aktivity MZAS, kterou lze rozdělit podle objemů nádrží vymezených dispečerskými grafy, u aktivity LOOD v případě, kdy je požadováno rozložení případného deficitu v dodávce vody v čase, nebo u aktivity PRUT pro potřebu zajištění minimálních průtoků.
- Kapacita úpravy vody: Jelikož kapacitu průtoku lze v modelu přiřazovat jen hranám grafu (nikoli uzlům), je nutné úpravu vody reprezentovat dvěma uzly a kapacitu úpravy přiřadit hraně mezi těmito uzly.

Aplikace modelu vyžaduje následující vstupní data (v rozsahu daném řešenou VS):

- Popis sítě vodních toků.
- Identifikace a lokalizace relevantních prvků (profilů, objektů), včetně polohy profilů na síti vodních toků.
- Identifikace převodů vody a dopravních cest (vodovodů), určení počátečního a koncového objektu/profilu.
- Časové řady přirozených průtoků v profilech VS.
- Požadavky na zachování minimálních průtoků.
- Požadavky na odběry vody.
- Údaje o vypouštění vod.
- Technické parametry objektů – objemy zásobního prostoru vodních nádrží, kapacity převodů vody a dopravních cest (vodovodů), kapacity úprav vody.
- Priority plnění požadavků na užívání vody – odběry vody, zachování minimálních průtoků, zachování objemu vody v nádržích.

Aplikace modelu probíhá v následujících krocích a příslušných algoritmech:

1. Naplnění vstupních dat modelu (viz výše).
2. Transformace objektů VS a vazeb mezi nimi do podoby orientovaného grafu ve formě výše popsaného strukturálního modelu.
3. Naplnění dolních a horních mezí kapacit hran grafu, reprezentujících jednotlivé výše popsané aktivity (viz vstupní a výstupní proměnné funkce systému výše).
4. Určení účelové funkce prostřednictvím „ocenění“ hran grafu. Ocenění vychází ze zadaných priorit naplnění jednotlivých požadavků na užívání vody.
5. Výpočet optimálního toku sítě pomocí algoritmu out-of-kilter.

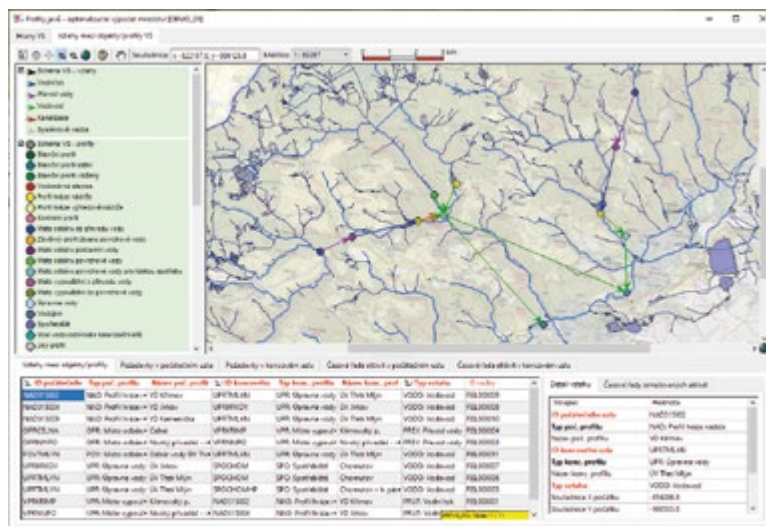
PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

Programové vybavení optimalizačního síťového modelu (VSTOOLS.OPTIM) je koncipováno jako aplikace pro spuštění na lokálním počítači uživatele. Podmínkou pro provoz aplikace je aktuální verze operačního systému Microsoft Windows s nainstalovanou aktuální verzí platformy Microsoft NET Framework. Hardwarové požadavky jsou dány pouze požadavky operačního systému a platformy Microsoft NET Framework, nicméně kvalita hardwarového vybavení podmiňuje (v přímé závislosti na rozsahu zpracovávaných dat) rychlost aplikací prováděných výpočtů. Software byl realizován s využitím vývojového prostředí Microsoft Visual Studio v programovacím jazyce Visual Basic. Z hlediska vývoje a realizace softwarových aplikací jde o prověřený komplexní nástroj standardně využívaný pro vývoj jednoduchých i velmi složitých (komplexních) aplikací.

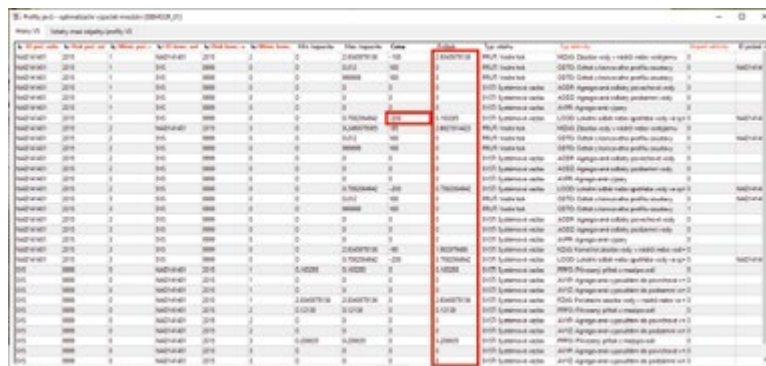
Struktura aplikace je tvořena jednotlivými spolupracujícími programovými moduly, které dohromady tvoří tzv. „sestavění“. Z hlediska funkce jde zejména

o administrační prostředí aplikace, výpočetní moduly, editor a prohlížeč dat a konfigurační soubory aplikace a uživatelského nastavení. Součástí aplikace je účelová geodatabáze dat organizovaná na principu relačních databází. Datové sady (vstupní data pro výpočty a výsledky výpočtů) jsou ukládány ve formátu strukturovaných textových souborů (txt, oddělovač středník, hlavička v prvním řádku souboru). Referenční datové sady (zejména vektorové mapové vrstvy) jsou ukládány ve formátech shapefile Esri (shp) a ve formátu mif/mid MapInfo, podkladová referenční rastrová data pak ve formátu hrr. Použití uvedených datových formátů bylo zvoleno s cílem maximálně zjednodušit manipulaci s daty i mimo prostředí realizovaného softwaru tak, aby uživatel mohl k datům přistupovat i z jím běžně používaných aplikací (nástrojů).

Aplikace umožňuje provádění dále uvedených výpočtů a vyhodnocení dat v grafickém uživatelském prostředí (GUI). Kromě samotných výpočetních funkcí aplikace nabízí též nástroje pro organizaci výpočtu, administraci vstupních dat a zobrazení a prezentaci výsledků výpočtů a vyhodnocení, a to zejména formou tabulek, map a grafů. Ukázky uživatelského rozhraní jsou uvedeny na obr. 3 a 4.



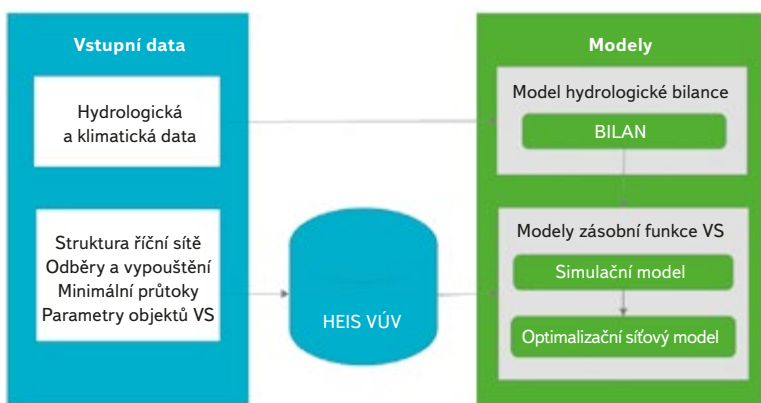
Obr. 3. Uživatelské rozhraní: vstupní data modelu
Fig. 3. User interface: model input data



Obr. 4. Uživatelské rozhraní: výstupní data modelu
Fig. 4. User interface: model output data

Aplikace vznikla jako součást skupiny nástrojů „VSTOOLS“. Jde o postupně vyvíjený, aktualizovaný a rozšiřovaný modulární systém nástrojů pro provádění různých druhů analýz, výpočtů a modelování vodohospodářských jevů. Programové vybavení optimalizačního modelu je koncipováno tak, aby prostřednictvím vhodného datového rozhraní umožňovalo komunikaci s datovou

základnou a dalšími programy využívanými ve VÚV TGM při řešení zásobní funkce vodohospodářských soustav a vodohospodářských bilancí. Jedná se především o Simulační model zásobní funkce vodohospodářských soustav [4] a model hydrologické bilance BILAN [5]. Pomocí tohoto modelu jsou metodou chronologické hydrologické bilance modelovány časové řady průtoků, které vstupují jak do simulačního, tak optimalizačního síťového modelu zásobní funkce VS. Vztahy mezi datovou základnou a modely jsou zjednodušeně ilustrovány na obr. 5. Jako datovou základnu lze využívat zejména relevantní evidence ISVS-VODA [6], především pak evidenci odběrů, vypouštění a akumulace vod vedenou podle [7] pro potřeby sestavení vodní bilance. Pro popis struktury říční sítě je účelné využívat Strukturální model vodních toků (tj. popis říční sítě v členění na úseky toků) vedený jako součást Digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD) [8]. Jako nástroj pro integraci vstupních dat (tj. naplnění vazeb mezi jednotlivými evidencemi) je ve VÚV TGM využívána databáze Hydroekologického informačního systému (HEIS VÚV) [9].



Obr. 5. Nástroje pro řešení problematiky zásobní funkce vodohospodářských soustav
Fig. 5. Tools for dealing with the problem of the storage function of water management systems

ZÁVĚR

Výše popsaný optimalizační síťový model VS je dostatečně obecný a lze jej aplikovat při posouzení zásobní funkce libovolné VS. Využití teorie grafů („síťový“ model) a algoritmu pro nalezení optimálního toku sítí umožňuje posuzovat jako celek složitější struktury vodohospodářských a vodárenských soustav z hlediska optimalizace plnění jejich zásobní funkce. Do modelu lze začlenit objekty subsystémů povrchové vody, podzemní vody i užívání vody, a posoudit tak zajištění distribuce vody z vodních zdrojů až po její spotřebu v obcích. Příslušné programové vybavení bylo vyvinuto a jeho funkčnost ověřena v rámci projektu Bezpečnostního výzkumu ČR. Využití modelu se předpokládá zejména při řešení projektu Technologické agentury ČR „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu“ („Centrum Voda“), případně v dalších projektech a studiích zaměřených na problematiku sucha a nedostatku vody a posouzení možných zmírňujících opatření.

Poděkování

Článek vznikl na základě výzkumu prováděného v rámci projektu V120192022159 „Vodohospodářské a vodárenské a soustavy a preventivní opatření ke snížení rizik při zásobování pitnou vodou“ programu BV III/1-VS, který financovalo Ministerstvo vnitra ČR.

Literatura

- [1] ZEMAN, V., LANK, B., BEČVÁŘ, V., MACHÁČEK, L., PROCHÁZKA, M. a kol. *Metody navrhování vodohospodářských soustav*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský, v. v. i., 1985.
- [2] LANK, B. *Síťový model vodohospodářské soustavy*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský, v. v. i., 1986.
- [3] DEMEL, J. *Grafy a jejich aplikace*. Academia 2022, s. 154–160. Dostupné též elektronicky pod licencí Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0: <https://kix.fsv.cvut.cz/~demel/grafy>
- [4] PICEK, J., VYSKOČ, P., ZEMAN, V. *Simulační model množství povrchových vod: zásobní funkce vodohospodářské soustavy*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský, v. v. i., 2008.
- [5] VIZINA, A., HORÁČEK, S., HANEL, M. Recent developments of the BILAN model. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2015, 57(4–5), 7–10.
- [6] Vyhláška č. 252/2013 Sb., o rozsahu údajů v evidencích stavu povrchových a podzemních vod a o způsobu zpracování, ukládání a předávání těchto údajů do informačních systémů veřejné správy.
- [7] Vyhláška č. 431/2001 Sb., o obsahu vodní bilance, způsobu jejího sestavení a o údajích pro vodní bilanci.
- [8] <https://www.dibavod.cz/>
- [9] <https://heis.vuv.cz/>

Autoři

Ing. Petr Vyskoč

✉ petr.vyskoc@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-5006-5414

Ing. Jiří Píček

✉ jiri.picek@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-6978-6801

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2023.03.003

OPTIMIZATION NETWORK MODEL OF WATER MANAGEMENT SYSTEMS

VYSKOČ, P.; PICEK, J.

T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague

Keywords: water resources — water supply — water management system — software

The paper describes software aimed at analysing water management infrastructure and identifying critical points for water supply and assessing possible measures aimed at optimising the water supply function of the water management system. The computational procedures integrate the evaluation of the hydrological characteristics of the area, the parameters of the water management and water supply systems and the water supply requirements. The solution uses graph theory and network flow optimization (out-of-kilter algorithm is applied). The program is implemented as a PC application and equipped with a user interface.