SIMULÁCIA TRANSPORTU KONZERVATÍVNEHO ZNEČISTENIA V POVRCHOVÝCH TOKOCH

Yvetta Velísková

Modely, ktoré sa používajú na simuláciu šírenia znečistenia v toku využívajú buď jednoduchú bilančnú rovnicu aplikovanú na sledovanom úseku toku alebo vo väčšine vychádzajú z riešenia advekčno-difúznej rovnice. Obsahom príspevku je porovnanie výsledkov simulácie šírenia sa znečistenia v toku Ondavy troma numerickými modelmi:

1. *modelom SIRENIE;*
2. *modelom MODI;*
3. *modelom WQMCAL.*

Nasimulované výsledky boli porovnané s meranými hodnotami koncentrácií fosforečnanov v toku. Zdrojom tejto látky bolo vyústenie mestskej kanalizácie zo Svidníka do toku Ondavy.
Z porovnania výsledkov simulácií s meranými hodnotami fosforečnanov v Ondave pod Svidníkom vyplýva, že model WQMCAL a SIRENIE je možné použiť na rýchly, ale hrubý odhad šírenia sa vlny znečistenia v toku. Na detailnejšie zobrazenie možnej situácie na toku v prípade úniku znečistenia je vhodnejší model MODI, ktorý je však aj náročnejší na vstupné údaje.

Kľúčové slová: numerická simulácia, znečistenie, povrchové toky, modelovanie, terénne merania

Simulation of pollution spreading in open channels. *Simulation models of pollution spreading in open channels are based on balance equation applied at a section of channel or they are based on solution to advection-diffusion equation. The paper deals with the comparison of results from three types of transverse-mixing model:*

1. *SIRENIE*
2. *MODI*
3. *WQMCAL.*

The results of simulation were compared with measured values of phosphate concentration along real part of open channel (the Ondava River between Svidník and Stropkov). The results of comparison show that it is possible to use WQMCAL and SIRENIE for prompt, but rough estimate of pollution spreading in channel. However, for more detailed analysis it is better to use MODI, which is more accurate. On the other hand, MODI requires as well as more detailed input data than previous models.

Key words: numerical simulation, pollution, surface water, open channels, field measurement

---

ÚVOD

Vzhľadom na existenciu a rozmiestnenie urbanizovaných oblastí pozdĺž povrchových tokov sa neustále zväčšuje potreba vedieť tieto toky hodnotiť či už z hľadiska kvantitatívneho alebo kvalitatívneho. Z hľadiska kvantitatívneho sú to hlavne povodne, ktoré v poslednom období ohrozujú životy a majetok ľudí sídliacich v okolí tokov. Z hľadiska kvalitatívneho sú to problémy, ktoré vyplývajú z používania povrchových tokov ako recipientov odpadových vôd na jednej stane, no a na druhej mnohé povrchové toky môžu byť zdrojmi úžitkovej vody. V mnohých prípadoch sa ale stávajú dokonca aj zdrojmi pitnej vody alebo majú v svojich príbrežných oblastiach zdroje pitnej vody, ktoré môžu svojou kvalitou ovplyvňovať.
Riešenie kvalitatívnych zmien v povrchových tokoch úzko súvisí s transportom látok v týchto tokoch a s poznaním mechanizmu zmiešavania nesených látok s vodou. Neodmysliteľným prostriedkom riešenia úloh spojených s problémami kvality povrchových vôd je v dnešnej dobe práve matematické a numerické modelovanie.

MOŽNOSTI URČENIA KONCENTRÁCIÍ ZNEČISŤUJÚCICH LÁTOK V TOKU

Modely kvality vody v toku môžeme rozdeliť na:

- modely, ktoré vychádajú z riešenia jednoduchej bilančnej rovnice

- modely postavené na základe analytických riešení advekčno-difúznej rovnice
- modely postavené na základe numerického riešenia advekčno-difúznej rovnice.

Jednoduchá bilančná rovnica

V prípade ustáleného stavu na toku (s konštantným prietokom a koncentráciou nemeniacou sa v čase) sa na výpočet koncentrácie c znečisťujúcej látky v recipiente využíva jednoduchá bilančná rovnica v tvare (Jólankai, 1992):

$$c = \frac{c_o Q_o + c_p Q_p}{Q_o + Q_p} \tag{1}$$

kde: c_o - pôvodná koncentrácia znečisťujúcej látky v recipiente [kg.m^{-3}];
c_p - koncentrácia znečisťujúcej látky [kg.m^{-3}];
Q_o - prietok v recipiente [m^3.s^{-1}];
Q_p - výdatnosť (prietok) znečisťujúcej látky vtekajúcej do toku [m^3.s^{-1}].

Advekčno-difúzna rovnica a jej analytické riešenia

Mnohé modely šírenia znečistenia v toku vychádzajú zo základnej advekčno-difúznej rovnice:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \in_x \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \in_y \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \in_z \frac{\partial c}{\partial z} \pm \alpha . c \pm F , \tag{2}$$

kde: t - čas [s],
$c(x, y, z, t)$ - koncentrácia látky [kg.m^{-3}],
$\in_x , \in_y , \in_z$ - koeficient disperzie v pozdĺžnom, priečnom a vertikálnom smere [m^2.s^{-1}],
v_x , v_y , v_z - stredná profilová rýchlosť prúdenia recipientu [m.s^{-1}],
α - reakčný koeficient (rozpadu, samočistenia) látky [s^{-1}],
$F(x, y, z, t)$ - funkcia, reprezentujúce zdroje znečistenia [kg.m^3.s^{-1}],
x, y, z - priestorová premenná [m].

V ďalšej časti sú uvedené používané analytické riešenia tejto rovnice pre konkrétne podmienky prúdenia a zdroje znečistenia.

Priečna disperzia z kontinuálneho bodového zdroja

Za podmienok, že znečisťujúca látka má konzervatívny charakter, po hĺbke toku je dokonale premiešaná, pri zanedbaní zmien rýchlosti v priečnom smere (pri širokých plytkých tokoch splnené), a za predpokladu, že hĺbka v koryte je konštantná a pozdĺžna disperzia je vzhľadom na advekciu zanedbateľná, možno vzťah (2) pre kontinuálny bodový zdroj znečisťujúcej látky zjednodušiť na tvar:

$$v_x \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\in_y \frac{\partial c}{\partial y} \right). \tag{3}$$

V danom prípade popisuje rovnica (3) šírenie sa znečistenia v priečnom smere v profile nekonečne širokom. Analytické riešenie tejto rovnice pri centrálnom zdroji bodového znečistenia s výdatnosťou M má tvar:

$$c = \frac{M}{2h\left(\pi \in_y v_x x\right)^{1/2}} \; exp\left(- \frac{v_x}{4 \in_y x} y^2 \right), \tag{4}$$

kde M - prítok znečisťujúcej látky [kg.s^{-1}].

V reálnych prípadoch samozrejme nemôžeme uvažovať s nekonečne širokým tokom. Akonáhle znečistenie dosiahne breh, je potrebné do riešenia zahrnúť brehový efekt. V prípade plného brehového efektu a bodového zdroja znečistenia vo vzdialenosti y_o od brehu má analytické riešenie tvar:

$$c = \frac{M}{2h\left(\pi \in_y v_x x\right)^{1/2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ exp\left[-\frac{v_x}{4 \in_y x}\left(y - y_o + 2nB\right)^2 \right] + exp\left[-\frac{v_x}{4 \in_y x}\left(y + y_o - 2nB\right)^2 \right] \right\}, \tag{5}$$

kde y_o -vzdialenosť zaústenia zdroja znečistenia do toku od brehu $y = 0$ [m].

Toto riešenie vychádza z práce Starosolszkého (1987), ktorý uvádza riešenie pre priečne šírenie znečistenia z kontinuálneho, centrálne umiestneného zdroja. Vychádzajúc z uvedeného riešenia pre centrálny zdroj bola rovnica upravená pre zdroj znečistenia vo vzdialenosti y_o od brehu.

Pozdĺžna disperzia z okamžitého bodového zdroja

V prípade priamych úsekov prirodzených tokov s dostatočným sklonom, ktoré vo väčšine prípadov spĺňajú podmienku širokých plytkých korýt, je pozdĺžna zložka rýchlosti prúdenia v_x v toku rozhodujúca. Zložky rýchlosti v_y a v_z možno zanedbať. Potom za predpokladu konzervatívnosti kontaminantu, jeho dokonalého premiešania v priečnom smere a ustáleného rovnomerného stavu v toku možno rovnicu (2) zjednodušiť na tvar:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \in_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - u\frac{\partial c}{\partial x} \tag{6}$$

kde u - priemerná profilová rýchlosť [m.s^{-1}];

$\in_x$ - koeficient pozdĺžnej disperzie (platný pre celý priečny profil).

Analytické riešenie tejto rovnice pri počiatočnej podmienke $c(x,0) = 0$ (pre $t=0$), okrajovej podmienke $c(0, t) = 0$ (*pre* $x=0$) a pri množstve vstupujúceho bodového znečistenia G má tvar:

$$c = \frac{G}{2A\left(\pi \in_x t\right)^{1/2}} exp\left(-\frac{\left(x - ut\right)^2}{4 \in_x t} \right), \tag{7}$$

kde G - množstvo znečisťujúcej látky v [kg], ktoré sa jednorázovo („okamžite“) dostalo do toku.

Samočistenie

Pre vyjadrenie nekonzervatívnosti látok, ako aj pre zmeny BSK, príp. rozpusteného kyslíka, bol vo svete zostavený celý rad modelov. V praxi sa najviac používajú modely vychádzajúce zo Streeterovej-Phelpsovej rovnice I. rádu:

$$\frac{dc(t)}{dt} = -\alpha . c(t). \tag{8}$$

Za predpokladu ustáleného rovnomerného prúdenia v toku a kontinuálneho zdroja znečistenia rieky v sledovanom úseku pre $c(t)$ platí:

$$c(t) = c_o(t).e^{-\alpha.t} \tag{9}$$

Využitie existujúcich modelov kvality vody je podmienené správnym určením parametrov toku, disperzných koeficientov, ako aj reakčných koeficientov.

Priečna a pozdĺžna disperzia z bodového zdroja znečistenia

Dvojrozmerná forma advekčno-difúznej rovnice s uvážením samočistenia má tvar:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} = \in_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \in_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - \alpha.c\,, \tag{10}$$

Riešenie rovnice (10) pri plnom zohľadnení brehového efektu pre bodový zdroj znečistenia má tvar (Pekár, Pekárová a Mendel, 1991; Pekárová a Pekár, 1993):

$$c(x,y,t) = \frac{G}{4\pi ht\left(\in_x \in_y\right)^{1/2}}.exp\left[-\frac{(x-v_x t)^2}{4\in_x t}\right].exp(-\alpha.t)\,.$$

$$.\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left\{exp\left[-\frac{(y-y_o-2nB)^2}{4\in_y t}\right]+exp\left[-\frac{(y+y_o+2nB)^2}{4\in_y t}\right]\right\}, \tag{11}$$

kde: B - šírka toku,
y_o - vzdialenosť zdroja znečistenia od brehu y=0.

Analytické riešenie rovnice (10) vychádza z prác Starosolszkého (1987) a Jolánkaia (1997).

Numerické modely

Pri každom doteraz spomínanom analytickom riešení advekčno-difúznej rovnice sa uvažovalo s určitými zjednodušujúcimi predpokladmi, príp. s okrajovými podmienkami, ktoré limitovali použitie výsledných analytických riešení.

Je množstvo prípadov, kedy rovnica (2) nemá priame analytické riešenie. Vtedy je vhodné a možné ju riešiť numericky pomocou rôznych numerických metód (napr. diferenčné metódy, metóda konečných prvkov, metóda hraničných prvkov, metóda charakteristík, metóda konečných objemov a pod.). Výsledkom takého postupu je numerický model, ktorý v závislosti na okrajových podmienkach s určitou presnosťou dokáže simulovať prenos znečistenia v toku.

V príspevku sú porovnané výsledky simulácie šírenia sa znečistenia s rovnakými parametrami v rovnakom úseku toku Ondavy troma numerickými modelmi:

4. modelom SIRENIE;
5. modelom MODI;
6. modelom WQMCAL.

Nasimulované výsledky boli porovnané s meranými hodnotami koncentrácií fosforečnanov v toku Ondavy. Zdrojom tejto látky bolo vyústenie mestskej kanalizácie zo Svidníka do toku Ondavy.

Opis modelov

Model SIRENIE je založený na rovniciach (5) a (11). Týmto modelom je možné simulovať priečne šírenie znečistenia do toku z kontinuálneho zdroja i z okamžitého bodového zdroja znečistenia (Mendel a kol. 1992).

Model MODI bol vyvinutý na ÚH SAV autormi Velísková a Kohutiar. Model je založený na numerickom riešení dvojrozmernej formy advekčno-difúznej rovnice (2), ktorá vychádza z predpokladu, že zmiešavanie vo vertikálnom smere je možné zanedbať. Tento predpoklad je platný pre široké plytké toky, v ktorých zmiešavanie v horizontálnom smere prevláda nad vertikálnym, čo je pri väčšine prirodzených tokoch splnené. Model MODI využíva koncept tzv. prúdových trubíc. Tento koncept vychádza z často používanej súradnicovej sústavy Yotsukuru a Sayra (1976), ktorá rozdeľuje tok po šírke na sústavu trubíc nerovnakej šírky, ale s rovnakým prietokom. Model je schopný dvojrozmerne simulovať zmiešavacie procesy v neprizmatických korytách pri ustálenom prúdení. Pri simulácii šírenia látok nekonzervatívneho charakteru na dlhších úsekoch toku je možné zohľadniť vplyv samočistiacich procesov. Zdroje znečisťujúcich látok môžu byť simulované aj s neustáleným výtokom, a situované môžu byť v ľubovoľnom mieste posudzovaného úseku toku. Vstupné údaje modelu MODI pre ľubovoľný úsek akéhokoľvek povrchového toku sú pomerne dostupné. Je to popis posudzovaného úseku toku priečnymi a rýchlostnými profilmi v charakteristických miestach posudzovaného úseku a hodnotami koeficienta priečnej disperzie, príp. reakčného koeficienta. Podrobný opis a východiská modelu MODI sú uvedené v práci Velísková (1995).

Programový balík WQMCAL je založený na jednoduchých analytických riešeniach rovníc redukcie, disperzie a transportu znečistenia. Preto sú výpočty veľmi rýchle a vyžadujú iba základné charakteristiky opisujúce tok (zvyčajne prietoková plocha A, priemerná rýchlosť toku u, šírka toku B, priemerná hĺbka toku h, charakteristiky udávajúce množstvo znečistenia - koncentrácia alebo množstvo znečisťujúcej látky, počiatočná koncentrácia c_o a pod).

POROVNANIE VÝSLEDKOV SIMULÁCIÍ S NAMERANÝMI HODNOTAMI

Terénne experimenty boli vykonávané v rokoch 1990–1993 v experimentálnom povodí Ondavy po nádrž Veľká Domaša. Ich cieľom bolo určenie koeficientov priečnej a pozdĺžnej disperzie, ako aj určenie koeficientov samočistenia pre fosforečnany a dusičnany v toku Ondavy.

Na obr. 1 je znázornená schéma modelovaného úseku - sútok Ondavy s Ladomírkou vo Svidníku, naznačené je vyústenie mestskej kanalizácie, ako aj odberné profily A, B, C. V týchto profiloch bol tok hydrometrovaný a s krokom 1 m boli v zameraných profiloch odoberané vzorky vody (júl 1992). Podrobný opis experimentov možno nájsť v prácach Pekárovej a Pekára (1993), Mendela a Pekárovej (1995) a Pekárovej a Velískovej (1998).

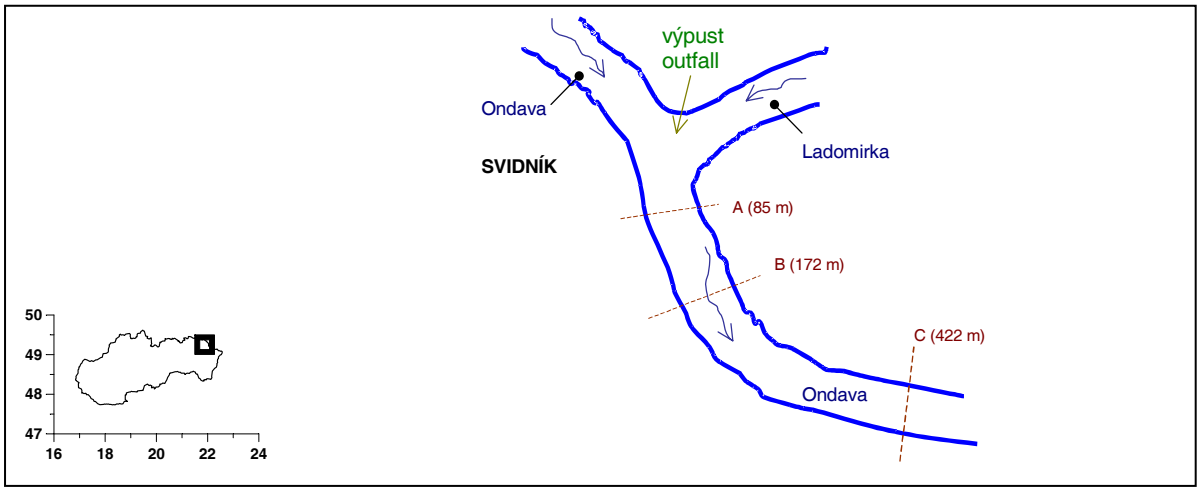
Výsledky experimentálnych meraní v povodí Ondavy boli použité v tejto štúdii na porovnanie s výsledkami už spomínaného modelu SIRENIE založenom na rovnici (5) autora Pekára (Pekár, Pekárová a Mendel., 1991; Pekárová a Pekár, 1993), modelu MODI založenom na numerickom riešení dvojrozmernej formy rovnice (2) (Velísková a Kohutiar, 1992; Velísková, 1995) a programového balíka WQMCAL[1] (Jolánkai, 1997).

Na obr. 2 sú vykreslené nasimulované hodnoty koncentrácií fosforečnanov troma modelmi**,** ako aj merané hodnoty získané počas experimentálnych meraní na toku Ondava.

ZÁVER

Priebehy nasimulovaných koncentrácií fosforečnanov modelmi WQMCAL a SIRENIE môžeme považovať za veľmi tesné, a to hlavne v profile C (x = 422m). Odchýlky v hodnotách vyplývajú z chýb zaokrúhľovania: model WQMCAL neumožňuje zadanie desatinných hodnôt.

[1] Programový balík spracovaný Dr. G. Jolánkaiom, je súčasťou záverečnej správy zhrňujúcej výsledky riešené v rámci Medzinárodného hydrologického programu V. projektu 8.1, ktorá vyšla v roku 1997 pod názvom Basic river water quality models (Technical Documents in Hydrology, No.13). Disketa s programom je súčasťou uvedenej správy.



Obr. 1. Schéma simulovaného úseku toku.
Zaústenie odpadových vôd a odberné profily A, B, C (vzdialenosť odberného profilu od zaústenia mestskej kanalizácie).

Fig. 1. Scheme of simulated stream part.
Outfall of wastewater and sampling profiles A, B, C (distance from outfall of urban sewerage system).

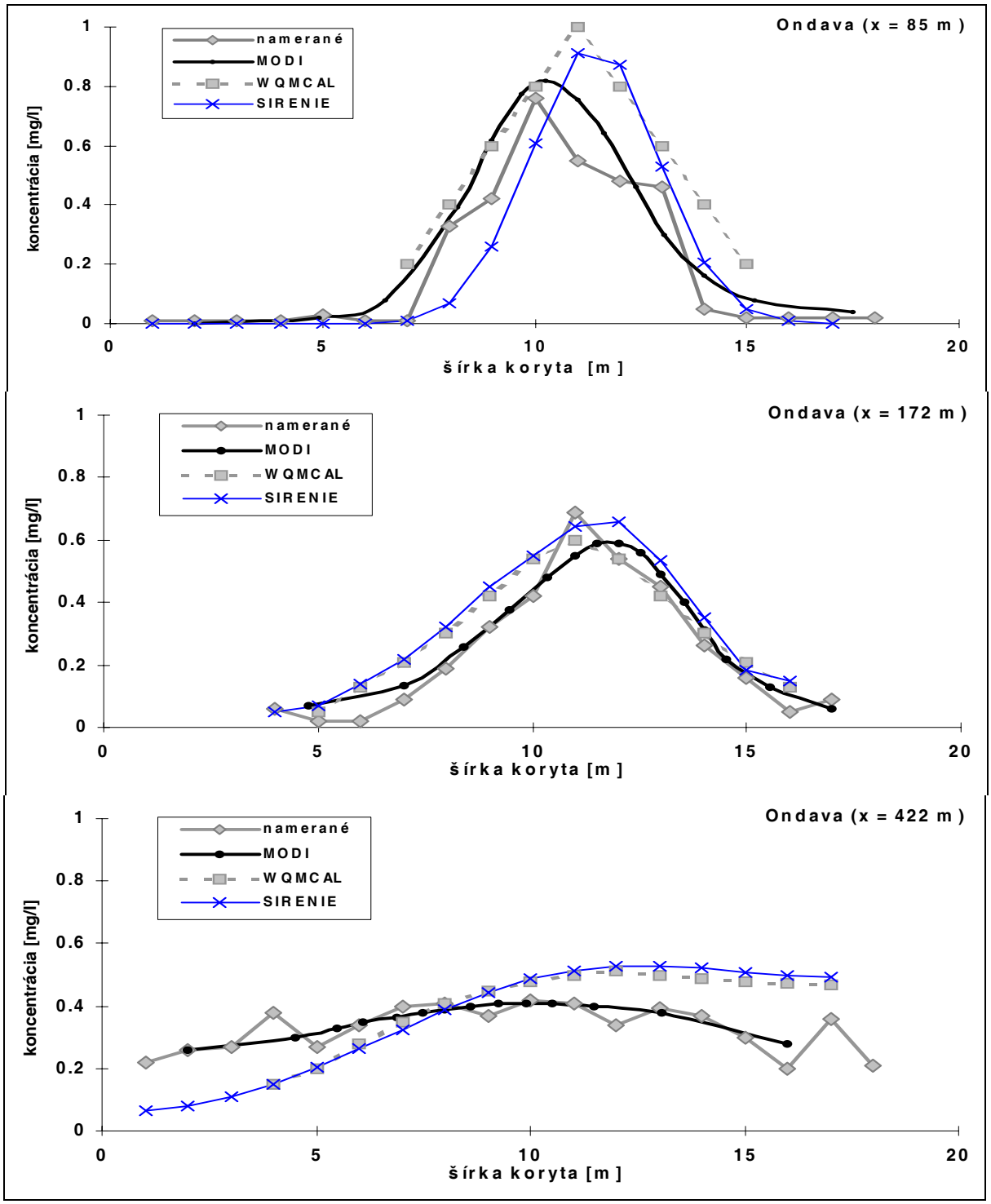
Korešpondovanie výsledkov oboch modelov pravdepodobne vyplýva z toho, že oba tieto modely sú založené na analytických riešeniach diferenciálnych rovníc. Na obr. 2 je možné ďalej pozorovať, že výsledky simulácie priečneho premiešavania v toku pri danom priečnom disperznom koeficiente $0{,}0126 m^2.s^{-1}$ sú posunuté vzhľadom na namerané hodnoty koncentrácií. Toto posunutie sa dá voľne interpretovať v tom zmysle, že reálne premiešavanie znečistenia v toku prebieha, resp. sa deje rýchlejšie ako pri simulovaní tohto deja. Je to pravdepodobne spôsobené tým, že ani jeden z týchto modelov nezohľadňuje rozdelenie rýchlosti po šírke prietočného profilu, čo môže v tomto smere ovplyvňovať výsledky vzhľadom na skutočnosť, že sledovaný úsek vykazuje mierne zakrivenie trasy toku.

Model MODI dosahuje vzhľadom na svoju detailnejšiu štruktúru, hydrodynamický prístup vyžadujúci zadanie morfológie koryta a rýchlostných profilov lepšie výsledky. Jeho zhoda s nameranými hodnotami by sa dala prípadne ešte zlepšiť podrobnejším delením oblasti na jednotlivé výpočtové elementy. Pri riešení konkrétnych úloh týkajúcich sa šírenia znečistenia v povrchových tokoch je táto podrobná simulácia opodstatnená do toho okamihu, než dôjde k úplnému premiešaniu kontaminantu po šírke toku.

Z porovnania výsledkov simulácií s meranými hodnotami fosforečnanov v Ondave pod Svidníkom vyplýva, že model WQMCAL a SIRENIE je možné použiť na rýchly, ale hrubý odhad šírenia sa vlny znečistenia v toku. Je možné ním operatívne simulovať rôzne havarijné situácie na tokoch (úniky rôznych množstiev znečistenia). Na detailnejšie zobrazenie možnej situácie na toku v prípade úniku znečistenia je vhodnejší model MODI, ktorý je však aj náročnejší na vstupné údaje oproti spomínaným dvom.

Výsledky tejto štúdie potvrdzujú nutnosť a opodstatnenosť i naďalej sa zaoberať problematikou simulácie transportu znečistenia v povrchových tokoch, pretože i keď modely simulujú realitu s rôznym stupňom presnosti, nie je možné zanedbať fakt, že pri skutočnej havárii v reálnom toku je možné ich aplikáciou odhadnúť rýchlosť postupu vlny znečistenia a jej šírenie, vytypovať miesta odberov vzoriek vody v toku, ako i miesta pre hydrometrovanie toku. Na druhej strane, výsledky štúdie, a nielen tejto, ale aj napr. štúdie Kosorina a Dulovičovej (Kosorin, Dulovičová, 2000) potvrdzujú, že pri výbere a aplikácii numerických modelov je potrebné poznať ich štruktúru, vedieť z čoho vychádzajú a akým spôsobom riešia daný problém, aby sa dala posúdiť správnosť ich použitia.

Poďakovanie
Spracovanie štúdie bolo podporené Agentúrou na podporu vedy a techniky prostredníctvom finančnej podpory projektu č. APVT-51-006502 a č. APVT-51-017804, ako aj z projektu VEGA č. 2/5054/25.



Obr. 2 Porovnanie nameraného a vypočítaného rozdelenia koncentrácí fosforečnanov v toku Ondavy (profily A, B a C sú rozmiestnené podľa obr.1).

Fig. 2 Comparison of measured values and phosphate concentration distribution acquired from simulations at the Ondava River (the cross-section A, B, C are situated according to fig.1).

Literatúra

Jolánkai, G. (1992): Hydrological, chemical and biological precesses of contaminant transformation and transport in river and lake system. IHP-IV. Technical Documents in Hydrology, UNESCO, Paris, 147 str.

Jolánkai, G. (1997): Basic river water quality models. IHP-V. Technical Documents in Hydrology 13. UNESCO, Paris, 52 str.

Kosorin, K., Dulovičová, R. (2000): K metodickým problémom viacrozmernej počítačovej simulácie pohybu povrchových a podzemných vôd. Acta Hydrologica Slovaca, 1, 217-222.

Mendel, O., Pekár, J., Pekárová, P. (1992): Modelovanie priečneho šírenia sa znečistenia vody v toku rieky. Vodohosp. Čas., 40, 2, 113–134.

Pekár, J., Pekárova, P., Mendel, O. (1991): A model of transverse spreading of water pollution in the river. In "Mathematical Modelling in Engineering", Technical University Praha, 64–66.

Pekárová, P., Mendel, O. (1995): The Influence of Municipal Sewage in the Ondava River. In: Proceedings of the International UNESCO-IHP Workshop "The Role of Water in Urban Planning", Wageningen and Emscher region, March 29. - April 2. 1993, (Ed. Hans van Engen, Dietrich Kampe, Sybrand Tjallingii), Backhuys Publishers, Leiden, 270–274.

Pekárová, P., Pekár, J. (1993): Experimentálne metódy určenia koeficientov matematického modelu pozdĺžnej disperzie a samočistenia. Vodohosp. čas., 41, 6, 398–411.

Pekárová, P., Velísková, Y. (1998): Modelovanie kvality vody v toku Ondavy. VEDA, Bratislava, 254 str.

Starosolszky, Ö. (1987): Applied surface hydrology. WRP. 141–149.

Velísková, Y., Kohutiar, J. (1992): Two-dimensional model of dispersion in natural channel. Vodohosp. Čas. 40, 5, 409–424.

Velísková, Y. (1995): Posudzovanie disperzných vlastností povrchových tokov pri dvojrozmernej idealizácii, KDP, ÚH SAV.

Yotsukura, N., Sayre, W.W. (1976): Transverse mixing in natural channels, WRR, Vol. 12,No. 4, 695–704.

Autor

Ing. Yvetta Velísková, PhD.
Ústav hydrológie SAV
Račiansja 75
831 02 Bratislava 3
Slovenská republika

E-mail: Yvetta.Veliskova@savba.sk