

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

V zbirki je izvorna različica izdajatelja.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is a publisher's version PDF file.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Sirnik, N, Vilhar, G, Širca, A, Rajar, R, Žagar, D, Četina, M. 2014. Siprek: program za hitro oceno onesnaženosti vodotoka v primerih razlitij nevarnih snovi = Siprek: a computer program for stimulating spills of hazardous chemicals in natural watercourses. Acta hydrotechnica 25, 43: 117 - 127.

<http://ksh.fgg.uni-lj.si/ksh/acta/>

Datum arhiviranja / Archiving Date: 3-10-2014

UDK/UDC: 004.4:502.51:504.5(497.4)

Prejeto/Received: 22. 3. 2013

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 16. 4. 2014

SIPOREK: PROGRAM ZA HITRO OCENO ONESNAŽENOSTI VODOTOKA V PRIMERIH RAZLITIJ NEVARNIH SNOVI

SIPOREK: A COMPUTER PROGRAM FOR SIMULATING SPILLS OF HAZARDOUS CHEMICALS IN NATURAL WATERCOURSES

Nataša Sirknik^{1,*}, Gregor Vilhar², Andrej Širca³, Rudolf Rajar¹, Dušan Žagar¹, Matjaž Četina¹

¹ Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Hajdrihova 28, 1000 Ljubljana

² IRGO Consulting, Slovenčeva 93, 1000 Ljubljana

³ IBE, Hajdrihova 4, 1001 Ljubljana

Izvleček

Siporek je računalniški program, namenjen hitri oceni posledic onesnaženja vodotokov v primerih razlitij nevarnih snovi. V osnovi je enodimenzijski, vendar omogoča tudi poenostavljeno določanje koncentracije in časa potovanja onesnažila v ožjih akumulacijah (npr. v zajezbah hidroelektrarn, idr.); uporabimo ga lahko vedno, ko tok ni preveč dvo- ali tridimenzijski. Rezultat modeliranja sta hitrost potovanja onesnažila ter graf spreminjanja koncentracije razlite snovi vzdolž vodotoka; za vsak računski primer je možno izrisati krivulji c-t ali c-x. Pri določanju časa potovanja onesnaženja program upošteva advekcijo in disperzijo, pri določanju koncentracije razlite snovi pa še izhlapevanje onesnažila ter mehansko širjenje madeža. S programom Siporek je možno modelirati vse vrste vodotokov, ki nastopajo v Sloveniji: od deročih hudourniških do mirnejših ravninskih; poenostavljeno je možno upoštevati tudi vpliv jezov in slapov na hitrost potovanja onesnažil.

Siporek je uporabniku prijazen in enostaven za uporabo. Napisan je v programskem jeziku C++, za grafični vmesnik smo uporabili knjižnico Qt 4.7. Računski čas znaša okoli 1 sekundo. Za račun potrebujemo razmeroma malo vhodnih podatkov: podatke o poenostavljeni geometriji struge, naklon dna, Manningov koeficient trenja, pretok, podatke o dinamiki izliva onesnaženja. Uporabljamo prečni prerez pravokotne ali trapezne oblike; os vodotoka opišemo kot vsoto posameznih linearnih odsekov z enotnim prečnim prerezom in konstantnimi parametri. Da bi rezultate v primeru razlitij nevarnih snovi dobili čim hitreje, smo vnaprej pripravili že tudi zbirko potrebnih vhodnih podatkov za celotno rečno mrežo Slovenije (za vse vodotoke, širše od 5 m).

Ključne besede: računalniški program, razlitja nevarnih snovi, vodotoki, hitrost potovanja onesnaženja, koncentracija razlite snovi.

Abstract

* Stik / Correspondence: natasa.sirknik@fgg.uni-lj.si

© Sirknik N. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0](#).

© Sirknik N. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – Share Alike 4.0 Licence](#).

Siporek is a computer program that was developed as a quick modelling tool for calculating the consequences of spills of hazardous chemicals in rivers. Basically, it is a 1-dimensional model, but it also enables us to take into account narrow accumulations (as it is the case in hydroelectric power plant constructions on rivers); it can be used in all cases where the flow is not explicitly 2- or 3-dimensional. The modelling results are in the form of a concentration curve along the channel and the speed of propagation of pollutants; for each calculation a c-t or a c-x graph is drawn. Additionally to advection and dispersion, the model takes into account evaporation and mechanical spreading of pollutants. Siporek can be used for modelling all types of rivers that can be found in Slovenia: from fast mountainous to slower flatland rivers. It is also possible to take into account a simplified representation of dams and waterfalls and their impact on river flow.

Siporek is a simple and user friendly program. It is written in C++, GUI is written in Qt 4.7. Computing time for one modelling case is about 1 second. Input data needed for computation are not many and not hard to acquire: simplified channel geometry data, channel slope, Manning's coefficient, discharge, data about pollutant spill dynamics. In general, a rectangular or a trapezoidal cross-section is used, while the axis of the watercourse is presented as a sum of linear segments with a uniform cross-section and constant parameter values. Moreover, to speed up the process of collecting the appropriate data in real cases, the chart of all Slovenian rivers broader than 5 m, on which all input parameters are shown, was prepared in advance.

Keywords: computer program, spills of hazardous chemicals, rivers, propagation speed of pollutant, pollutant concentration.

1. Uvod

Siporek je računalniški program, namenjen hitri oceni posledic onesnaženja vodotokov v primerih razlitij nevarnih snovi. Naročnik zadnje različice programa (2012) je Urad Republike Slovenije za zaščito in reševanje (URSZR).

Ko pride do razlitja nevarnih snovi v vodotoke, je pomembno, da ukrepamo zelo hitro – govorimo o minutah. Čim hitreje je potrebno določiti kraj iztoka nevarnih snovi, obseg onesnaženja in hitrost potovanja onesnažila vzdolž vodotokov. Šele na osnovi teh podatkov se lahko odločamo o ukrepih in možnostih sanacije vodnih virov. Onesnaženje skušamo zajezi čim bližje viru onesnaženja, pri tem uporabljamo različne tipe vodnih pregrad (baraž), vpojnih rol, trakov in pivnikov. Pri ukrepih in sanaciji sodelujejo Gasilske enote širšega pomena (GEŠP-i), Civilna zaščita in druge ustanove, večinoma pa gre za ljudi, ki običajno nimajo ustreznega znanja s področja mehanike tekočin. Zato je nujno, da program, ki ga za oceno stanja na terenu po izlivih nevarnih snovi v vodotoke potrebuje URSZR, ni samo hiter, temveč tudi enostaven za uporabo. Prav zato je Siporek zasnovan kot preprost računalniški program, ki od uporabnika ne

zahteva veliko teoretičnega znanja in se ga je možno priučiti v kratkem času.

Najnovejša različica programa Siporek temelji na predhodnih delih Katedre za mehaniko tekočin UL-FGG, predvsem na istoimenskem programu iz leta 1994 (Rajar et al., 1994; Širca in Rajar, 1997; Širca et al., 1994). Novost v primerjavi s starejšo verzijo programa je predvsem ta, da je po novem možno upoštevati tudi vpliv pragov, slapov, kaskad in zajezb na širjenje onesnažila vzdolž vodotoka. Posebno pozornost smo namenili izdelavi uporabniškega vmesnika, ki je sedaj modernejši, enostavnejši in namenjen širšemu krogu uporabnikov. Program smo napisali v jeziku C++, za grafični vmesnik pa smo uporabili knjižnico Qt 4.7.

Računski čas je izredno kratek, za en računski primer znaša le okoli 1 sekundo. Model je v osnovi enodimenzijski, a ga lahko uporabimo tudi za manjše (predvsem ožje) akumulacije (npr. za zajezbe hidroelektrarn, idr.) oz. vedno, ko tok ni preveč dvo- ali tridimenzijski. Omogoča modeliranje krajših ali daljših odsekov vodotokov; prav tako je možno modelirati vse vrste vodotokov, ki v Sloveniji nastopajo: od deročih hudourniških do mirnejših ravninskih.

Pri projektu URSZR 'Študija učinkovite uporabe vodnih baraž - OCV' (Četina et al., 2012) smo v sodelovanju z Inštitutom za vodarstvo (P. Banovec, M. Cerk, A. Cilenšek) program Siporek povezali s spletno aplikacijo 'Razlitje' (Razlitje, 2012) in s tem še dodatno poenostavili način priprave podatkov. Vrednosti tistih parametrov, ki jih je mogoče določiti vnaprej, smo za celotno rečno mrežo Slovenije zbrali v tabelah in na posebnih tematskih kartah. Ker so bile natančne meritve geometrije struge in ustrezno umerjanje koeficienta trenja doslej opravljene le za nekaj slovenskih vodotokov oz. njihovih odsekov, smo si pri določanju vrednosti teh parametrov pomagali s satelitskimi posnetki; večino podatkov smo uspeli z dovolj veliko natančnostjo določiti s pomočjo aplikacije Google Zemlja (Google Earth, 2013). Na osnovi tako zbranih vrednosti smo uspeli okvirni čas potovanja onesnažila za vse slovenske vodotoke izračunati vnaprej (okvirni zato, ker je dejanski čas potovanja odvisen od trenutne vrednosti pretoka in od časa iztekanja onesnažila, česar pa ne poznamo vnaprej; namesto tega smo pri računu uporabili značilne vrednosti pretokov Q_n , Q_{sr} , Q_v in enotno vrednost izlitega onesnažila 1000 kg v 10 min).

V svetovnem merilu poznamo mnogo enodimenzijskih hidrodinamičnih modelov in mnogi med njimi Siporek prekašajo v natančnosti (omenimo npr. samo dobro znan HEC-RAS (HEC-RAS, 2013)). A naše vodilo pri razvoju programa ni bila čim večja natančnost, temveč enostavnost in hitrost računanja. Edina smiselna izbira je bila zato poenostavljen enodimenzijski model, s katerim bo mogoče rezultate določati analitično. Izognili smo se tudi zamudnemu vnosu podatkov o prečnih profilih: pri delu s programom Siporek vodotok razdelimo na krajše odseke s konstantnimi vrednostmi parametrov, ki jih lahko določimo tudi s pomočjo satelitskih posnetkov.

Predvsem pa je pomembna povezava našega programa in spletne aplikacije 'Razlitje' (Razlitje, 2012): v svetu se že leta uveljavlja *preventivno* obvladovanje tveganj zaradi naravnih nevarnosti (Đurović in Mikoš, 2004), naš projekt pa za enkrat velja za edinstven primer priprave države na ukrepe v primerih razlitij nevarnih snovi.

2. O programu Siporek

S programom Siporek določamo spreminjanje koncentracije onesnažila v času in prostoru ter čas potovanja onesnažila vzdolž vodotokov. Modelirati je možno razlitje konservativnih in nekonservativnih onesnažil. Posebno pozornost smo pri razvoju programa namenili tistim onesnažilom, ki pri nas najpogosteje iztekajo v vodotoke: to so kurilno olje, nafta in bencin.

Na sliki 1 je prikazan uporabniški vmesnik s posameznimi kontrolnimi okni: levo okno je namenjeno sprotnemu izpisu in kontroli vhodnih podatkov, v oknu desno zgoraj se izriše graf za obravnavani primer, v oknu desno spodaj pa se izpisujejo rezultati.

2.1 Teoretične osnove

Siporek pri določanju časa potovanja onesnažil upošteva advekcijo in disperzijo, dodatno pa upošteva še procesa izhlapevanja onesnažila ter mehansko širjenje madeža. Na kratko razložimo še razliko med disperzijo in mehanskim širjenjem onesnažila. Disperzija ali turbulentna difuzija je posledica gibanja tekočine (v našem primeru vode) pod razlitim onesnažilom; v tem primeru turbulenca vode povzroči razpršitev (disperzijo) onesnažila. Mehansko širjenje pa je prisotno tudi, če se kapljevina pod razlitim onesnažilom ne premika (in tudi, če se onesnažilo razlije po trdnem telesu); v tem primeru je razpršitev posledica mehanskih lastnosti onesnažila in je funkcija težnosti, vztrajnosti, viskoznosti in površinske napetosti razlite snovi (Al-Rabeh et al., 2000).

Teoretične osnove programa Siporek povzemamo po Rajar et al. (1994) ter Širca et al. (1994). Predpostavljamo stalni enakomerni tok, za katerega velja Manning-Stricklerjeva enačba (enačba (1)):

$$Q = \frac{S^{5/3} \cdot \sqrt{I_0}}{O^{2/3} \cdot n_G}, \quad (1)$$

kjer je Q pretok [m^3/s], S prečni prerez struge [m^2], I_0 naklon dna [-], O omočeni obod [m], n_G Manning-Stricklerjev koeficient trenja [$sm^{-1/3}$].

V vsakem časovnem koraku rešujemo adveksijsko-difuzijsko enačbo v eni dimenziji (enačba (2)), katere analitično rešitev predstavlja enačba (3):

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = K_{X1} \cdot \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$\bar{c} = \bar{c}(x, t) = \frac{c_0 \cdot V_0}{2 \cdot S \sqrt{\pi \cdot K_{X1} \cdot t}} \exp \left[-\frac{(x - \bar{u} \cdot t)^2}{4 \cdot K_{X1} \cdot t} \right], \quad (3)$$

kjer je \bar{c} povprečna koncentracija onesnažila v prečnem prerezu S [kg/m^3], \bar{u} povprečna hitrost toka v prečnem prerezu S [m/s], t čas [s], x edina prostorska koordinata [m], K_{X1} linijski mešalni koeficient [m^2/s], V_0 volumen izlitega onesnažila [m^3], c_0 koncentracija onesnažila ob izlivu [kg/m^3].

Rešitev enačbe (3) dobimo ob predpostavkah, da je dolžina kanala neskončna, onesnažilo pa se takoj po izlivu premeša po celotnem prerezu S . K_{X1} določimo po empirični enačbi (4) (Fischer et al., 1979):

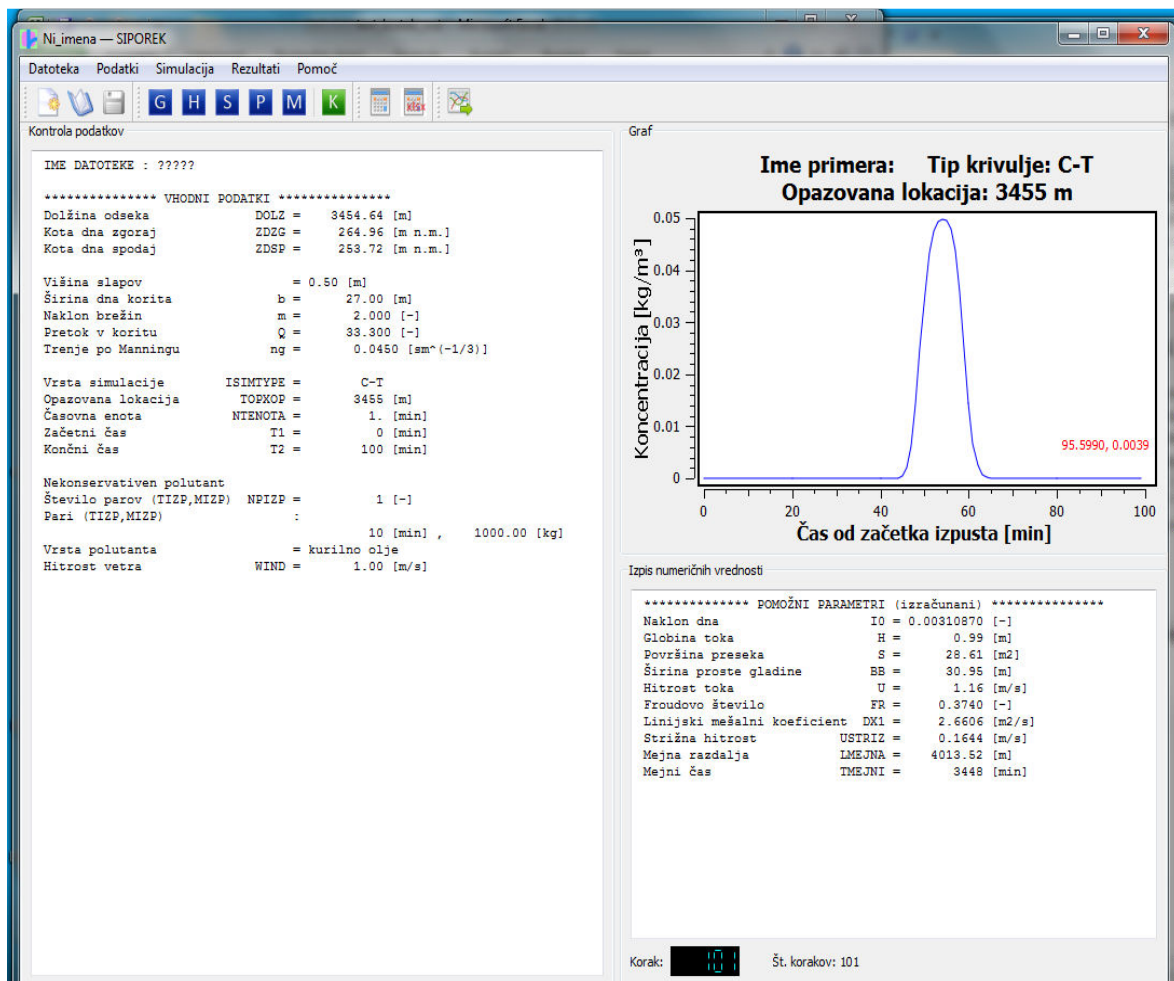
$$K_{X1} = \frac{0,011 \cdot \bar{u}^2 \cdot W^2}{h \cdot u_*}, \quad (4)$$

kjer je W povprečna širina korita [m], h globina vode [m], u_* strižna hitrost [m/s].

Strižno hitrost določimo po enačbi (5):

$$u_* = n_G \cdot \bar{u} \cdot \frac{\sqrt{g}}{\sqrt[3]{h}}, \quad (5)$$

kjer je g težnostni pospešek [m/s^2].



Slika 1: Kontrolna okna programa Siporek: levo vhodni podatki, desno spodaj izračunani parametri, desno zgoraj graf.

Figure 1: User interface of the Siporek computer program: input data on the left, computed parameter values bottom right, graph top right.

Ker je model Siporek enodimenzionalen, je pri presoji rezultatov nujno upoštevati predpostavko, da je onesnažilo dobro premešano in enakomerno razporejeno po celotnem prerezu S . Zaradi omenjene predpostavke je uporaba 1D advekcijsko-difuzijske enačbe omejena na območje dolvodno od razdalje L_m (enačba (6)):

$$L_m = \frac{0,1 \cdot \bar{u} \cdot W^2}{\varepsilon_t} \quad (6)$$

L_m pove, kako daleč stran od izvora onesnaženja se onesnažilo dejansko uspe premešati po celotnem prerezu struge. V enačbi (6) nastopa še prečni mešalni koeficient ε_t , ki ga določamo po enačbi (7):

$$\varepsilon_t = 0,6 \cdot h \cdot u_* \quad (7)$$

Program upošteva še izhlapevanje (to je pomembno predvsem v primeru razlitja bencina) in mehansko širjenje madeža. Delež izhlapele mase onesnažila F [-] določamo po Mackay et al. (1980) ter Shen et al. (1991) (enačba (8)):

$$F = \left(\frac{1}{C} \right) \left[\ln \frac{P_0}{101,325} + \ln \left(\frac{C \cdot K_E \cdot t}{60} + \frac{101,325}{P_0} \right) \right], \quad (8)$$

kjer je C empirična konstanta (glej Shen et al., 1991), P_0 začetni zračni tlak [kPa] (glej Shen et al., 1991), t čas od izliva [s].

Koeficient K_E določamo po Shen et al. (1991) (enačba (9)):

$$K_E = \frac{0,0025 \cdot U_{wind}^{0,78} \cdot A \cdot V_{molar}}{R \cdot T \cdot V_0}, \quad (9)$$

kjer je U_{wind} hitrost vetra [m/s], V_{molar} molski volumen onesnažila [m³/mol] (privzeta vrednost $V_{molar} = 200 \cdot 10^{-6}$; glej Širca in Rajar, 1997), R plinska konstanta (običajna vrednost je 8,314 [J/(mol·K)], v enačbi (9) pa uporabljamo vrednost $82 \cdot 10^{-6}$ [atm·m³/(mol·K)]); glej Shen et al., 1991), T temperatura madeža na površini vode [K] (privzeta vrednost: $T = 288$ K).

Površino madeža A v [m²] v odvisnosti od časa t določamo po Fayeve enačbi (Lehr et al., 1984) (enačba (10)):

$$A = \left(g \cdot V_0^2 \cdot t^{3/2} \cdot \nu_w^{-1/2} \cdot \frac{(\rho_w - \rho_0)}{\rho_0} \right)^{1/3}, \quad (10)$$

kjer je ν_w kinematična viskoznost vode [m²/s], ρ_w gostota vode [kg/m³], ρ_0 gostota onesnažila [kg/m³].

2.2 Modeliranje

Program Siporek ponuja več različnih možnosti modeliranja:

- Določitev krivulje $c-t$ (slika 2),
- Določitev krivulje $c-x$ (slika 3).

V primeru krivulje $c-t$ spremljamo, kako se na dani razdalji L_{opaz} spreminja vrednost koncentracije razlitega onesnažila v odvisnosti od časa t . Rezultat je graf, podoben temu na sliki 2. V primeru krivulje pa $c-x$ spremljamo, kako se v danem času t_{opaz} spreminja vrednost koncentracije razlitega onesnažila v odvisnosti od razdalje L . Rezultat je graf, podoben temu na sliki 3.

Posebnost programa je, da je mogoče obravnavani vodotok oz. njegov odsek uvrstiti v enega izmed petih tipov. To nam pogosto bistveno olajša delo, na ta način pa enostavno rešimo tudi nekaj problemov, ki so sicer stalna praksa pri delu z enodimenzijskimi programi. Pri modeliranju izbiramo med naslednjimi možnostmi (slika 4):

- obravnavani odsek vodotoka je brez posebnosti (brez zajezeb in slapov),
- obravnavani odsek vodotoka je zajezen,
- na obravnavanem odseku vodotoka so tudi slapovi,
- na obravnavanem odseku vodotoka so tako zajezbe kot tudi slapovi,
- hiter izračun časa potovanja onesnaženja.

Zajezbo opredelimo kot del vodotoka, v katerem se hitrost vode zmanjša zaradi ene izmed zajeznih zgradb (prag, jez, idr.). Večina zajezeb na slovenskih vodotokih je posledica bodisi manjših pragov in jezov (npr. na rekah Vipavi, Kolpi, idr) bodisi pregrad za hidroelektrarne (npr. na Dravi). Bistveno pri tem je, da se globina vode na

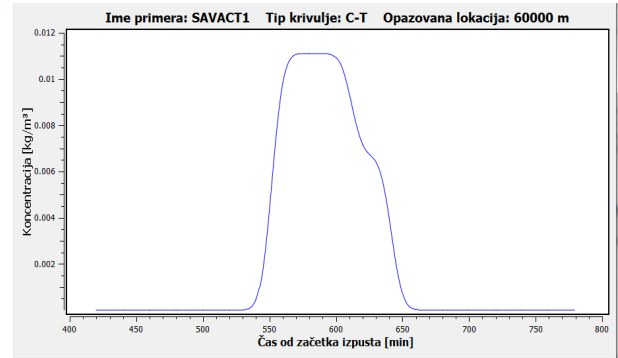
območju zajezbe spreminja od nižje na začetku zajezbe do višje tik pred jezom. Zato bi bilo ta območja neustrezno modelirati z enotno geometrijo struge, saj postopnemu višanju globine vode sledi postopno zmanjšanje hitrosti toka, s tem pa se čas potovanja onesnažil znotraj zajezbe ustrezno podaljša. Take primere v praksi običajno rešujemo s kompleksnejšimi 2D ali 3D (ali vsaj 1D neenakomernimi) modeli, a računski čas tovrstnih modelov pogosto presega čas, ki ga imamo v primerih razlitij nevarnih snovi na voljo za ukrepanje. Zato smo se v danem primeru odločili tudi znotraj zajezb uporabiti preprost 1D model Siporek, a s to razliko, da na tovrstnih odsekih vodotok razdelimo na več pododsekov (do 10) in za vsakega podamo povprečno globino vode. Siporek v tem primeru globine vode ne določi iz vrednosti pretoka Q (taka globina vode bi bila podcenjena), temveč uporabi našo podano vrednost. Kot primer navedimo, da lahko znaša globina slovenskih vodotokov v zajezbah hidroelektrarn tudi preko 30 m; računati z enotno vrednostjo globine toka, ki v običajnih primerih znaša le do 5 m, bi bilo zato povsem neustrezno. Obenem pa se moramo zavedati tudi, da je tok v tako velikih zajezbah vse prej kot enodimenzionalen in moramo biti zato pri interpretaciji rezultatov 1D modela previdni.

V primeru, ko so na vodotoku prisotni tudi slapovi (npr. Sava Bohinjka, Idrijca, idr.), je to potrebno upoštevati pri računu naklona dna vodotoka. Običajno Siporek določi naklon dna iz podanih L (določina odseka), z_{goraj} in z_{spodaj} (koti dna začetne in končne točke odseka) po:

$$I_0 = \frac{z_{\text{goraj}} - z_{\text{spodaj}}}{L} \quad (11)$$

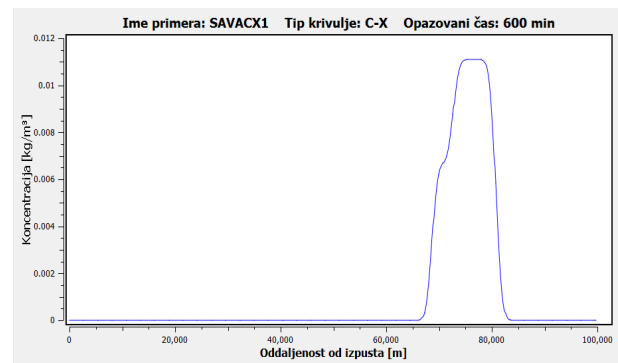
V primeru slapov pa je naklon dna ustrezno manjši:

$$I_{\text{SLAP}} = \frac{z_{\text{goraj}} - z_{\text{spodaj}} - H_{\text{SLAP}}}{L} \quad (12)$$



Slika 2: Krivulja $c-t$.

Figure 2: $c-t$ curve.



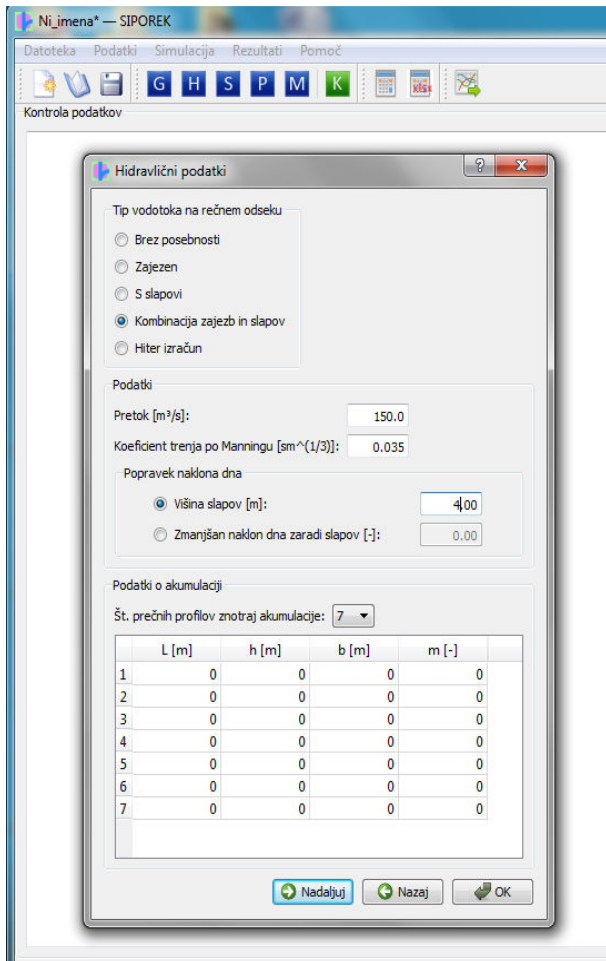
Slika 3: Krivulja $c-x$.

Figure 3: $c-x$ curve.

V nekaterih primerih je potrebno upoštevati tako zajezbe kot tudi slapove. Tak primer je npr. reka Krka, na kateri zaradi številnih kaskad ne moremo zanemariti ne vpliva zajezb ne slapov.

S programom Siporek je možno približno oceniti čas potovanja onesnažila tudi v primerih, ko ne razpolagamo s podatki o geometriji struge oz. je potrebno ukrepati zelo hitro. V tem primeru izberemo možnost 'Hiter izračun', ki zahteva vnos samo dveh podatkov: dolžine obravnavanega odseka L in približne hitrosti vode u .

Naj omenimo še, da je s programom Siporek možno računati tudi več primerov hkrati: programu v tem primeru podamo Excelovo vhodno datoteko z vsemi potrebnimi podatki, program pa jo zatem sam dopolni z rezultati.



Slika 4: Okno za vnos podatkov o zajezbah in/ali slapovih.

Figure 4: User interface for input data about possible accumulations or waterfalls in the channel.

3. Vhodni podatki in rezultati

3.1 Vhodne spremenljivke in parametri

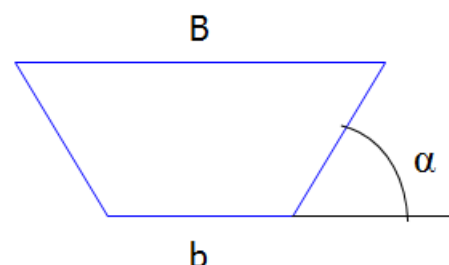
Za račun potrebujemo naslednje vhodne podatke:

- Dolžina rečnega odseka: L [m],
- Koti dna začetne in končne točke odseka: z_{zgoraj} , z_{spodaj} [m.n.m.],
- Pretok: Q [m³/s],
- Manningov koeficient trenja: n_G [sm^{-1/3}],
- Kotangens naklonskega kota brežin α : m [-],
- Širina dna korita: b [m],

- Podatki o onesnažilu: izbiramo med nafto, kurilnim oljem in bencinom,
- Podatki o dinamiki izliva onesnažila: podamo do deset parov podatkov oblike: v ____ min je izteklo ____ kg onesnažila),
- Hitrost vetra: v [m/s].

Pri modeliranju uporabimo povprečne vrednosti na danem odseku. Dolžino L ter koti dna z_{zgoraj} in z_{spodaj} dobimo iz kart ali satelitskih posnetkov (uporabimo npr. spletno aplikacijo Google Zemlja). Trenutno vrednost pretoka Q ter poljubne statistične vrednosti najdemo npr. na spletni strani ARSO (ARSO, 2014).

Za Manningov koeficient trenja n_G lahko poiščemo vrednosti v literaturi (npr. Chow, 1959; Rak, 2006; Steinman, 1999); če teh podatkov nimamo, pa lahko uporabimo najpogosteje uporabljeno vrednost 0,045, ki jo za zelo nizke pretoke ali močno zaraščene vodotoke še nekoliko povišamo (do 0,07), za večje vodotoke (npr. Drava, Mura) pa jo nekoliko znižamo (do 0,03 oz. 0,02 v primeru redno vzdrževanih umetnih kanalov). Pri izbiri n_G upoštevamo še, da je ta vrednost po izkušnjah strokovnjakov v primeru 1D modeliranja za okoli 35% višja kot v primeru 2D ali 3D modeliranja (Belleudy, 2000). Manningov koeficient trenja se je n_G izkazal za najboljčutljivejši parameter, od katerega so močno odvisne tudi vrednosti končnih rezultatov; podobne izkušnje navajajo tudi drugi avtorji, tudi v primerih večdimenzijskih modelov (Pestotnik et al., 2012).



Slika 5: Prečni prerez, kakršnega uporabljamo pri modeliranju s programom Siporek.

Figure 5: A typical cross-section used for modelling with Siporek.

Vrednost kotangensa naklonskega kota brežin m v praksi niha od 0 (pravokotno korito) do 10 (zelo razširjeni deli strug na območjih ravninskega meandriranja vodotokov). Ker se je za parameter m po opravljeni občutljivostni analizi izkazalo, da ne vpliva bistveno na rezultate, ga v primerih razlitij nevarnih snovi, ko je potrebno rezultate dobiti čim hitreje, lahko ocenimo iz satelitskih posnetkov. Če teh virov nimamo, pa lahko uporabimo tudi osnovni vrednosti 1 (za hribinske vodotoke) oz. 2 (za ravninske vodotoke). Širino dna struge b prav tako ocenimo iz satelitskih posnetkov; običajno je na ta način možno oceniti samo širino gladine struge B , vendar iz te vrednosti s pomočjo kotangensa naklonskega kota brežin m zlahka določimo širino dna struge b (glej sliko 5). Pri modeliranju je možno upoštevati tudi, da je prerez struge sestavljen in je torej širina struge pri nizkih pretokih manjša kakor pri srednjih in visokih pretokih. Tudi ti različni vrednosti b se da določiti s pomočjo Google Zemlja (Google Earth, 2013) ali podobnih satelitskih posnetkov: pogosto se da iz posnetkov razbrati, do kod sega matica toka; širino le-te v tem primeru vzamemo za b pri nizkih pretokih.

Čeprav večinoma opisujemo, kako lahko potrebne podatke določimo na osnovi satelitskih posnetkov, poudarimo, da lahko vrednosti geometrije struge določimo tudi iz meritev prečnih profilov. Te vrednosti so vsekakor bolj natančne, vendar je do teh podatkov razmeroma težko priti (oz. celo nemogoče, če govorimo o razlitjih nevarnih snovi, ko je potrebno ukrepati v nekaj minutah). Obenem pa rezultati modela niso zelo odvisni od (poenostavljenih) podatkov o geometriji struge, kot je pokazala občutljivostna analiza.

Za hitrost potovanja onesnaženja vzdolž vodotoka je hitrost vetra neobčutljiva spremenljivka, zato zanjo običajno uporabimo kar vrednost 1 m/s. Natančnejšo vrednost hitrosti vetra je potrebno uporabiti samo pri računu deleža izhlapele mase po razlitju bencina, saj je hitrost izhlapevanja le-tega zelo odvisna od hitrosti vetra. Poudarimo pa, da je v primerih razlitja zelo hlapnih snovi prednostna naloga zavarovanje mesta razlitja, da ne pride do eksplozije, in ne zajezitev onesnaženja vzdolž vodotoka.

3.2 Rezultati

Med rezultati so najpomembnejši (glej slike 2 in 3):

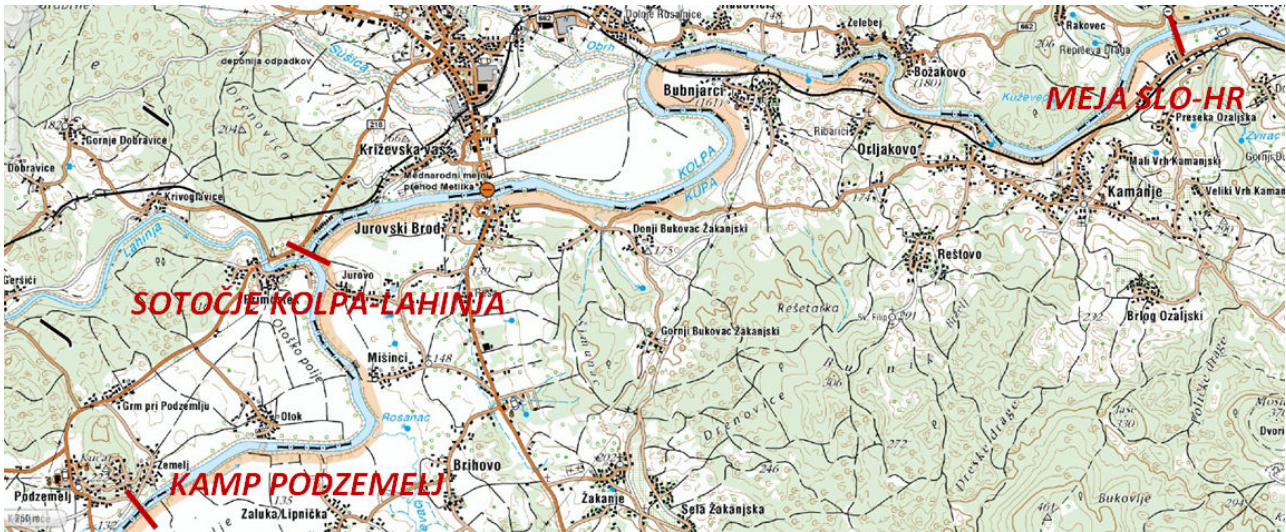
- t_{zac} : čas, ko začetna točka oblaka onesnaženja prispe do opazovane razdalje L_{opaz} (v primeru krivulje $c-t$); od tega trenutka dalje koncentracija onesnažila na razdalji L_{opaz} narašča [min],
- t_{max} : čas, ko na razdalji L_{opaz} nastopi višek koncentracije onesnažila [min],
- t_{kon} : čas, ko se koncentracija na razdalji L_{opaz} ponovno zmanjša na mejno vrednost [min],
- L_{zac} : razdalja, na kateri se v opazovanem času t_{opaz} nahaja začetek oblaka onesnaženja (v primeru krivulje $c-x$) [m],
- L_{max} : razdalja, na kateri se v času t_{opaz} nahaja višek koncentracije onesnažila [m],
- L_{kon} : razdalja, na kateri se v opazovanem času t_{opaz} nahaja konec oblaka onesnaženja [m],
- c_{max} : vrednost najvišje dosežene koncentracije izlitega onesnažila [kg/m^3].

Poleg teh program izračuna in izpiše tudi vrednosti tistih parametrov, ki za uporabnika predstavljajo koristno informacijo:

- Naklon dna: I_0 [-],
- Globina toka: H [m],
- Površina prečnega prereza struge: S [m^2],
- Širina gladine: B [m],
- Širina dna: b [m],
- Hitrost toka: u [m/s],
- Froudovo število: FR [-],
- Linijski mešalni koeficient: K_{Xl} [m^2/s]
- Strižna hitrost: $u_{strižna}$ [m/s],
- Mejna razdalja: L_{mejna} [m],
- Mejni čas: t_{mejni} [min].

Program zatem izriše graf, tj. krivuljo $c-t$ oz. $c-x$.

4. PRIMER UPORABE PROGRAMA SIPOREK



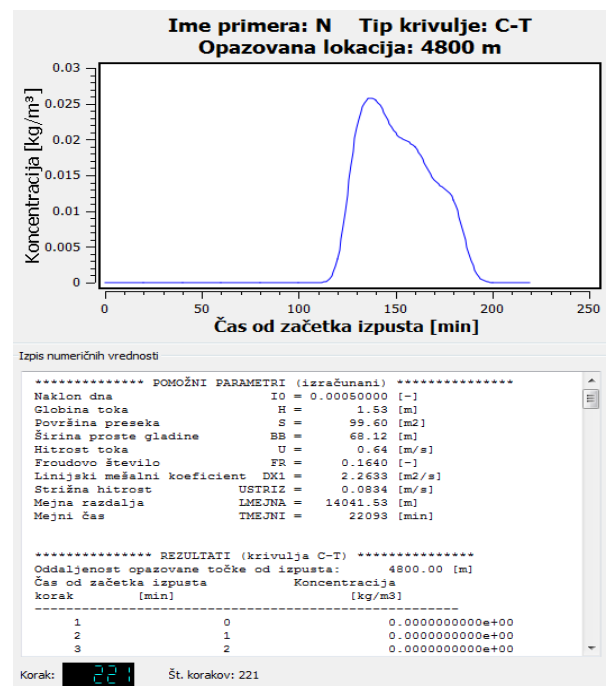
Slika 6: Računski primer: situacija (vir: Geopedia, 2013).

Figure 6: Case study: situation (source: Geopedia, 2013).

Preglednica 1: Vhodni podatki za odseka (a) in (b) na reki Kolpi: (a) od kampa Podzemelj do sotočja z reko Lahinjo (levo) ter (b) od sotočja z Lahinjo do hrvaške meje (desno). Pomen oznak je opisan v poglavju 3.1.

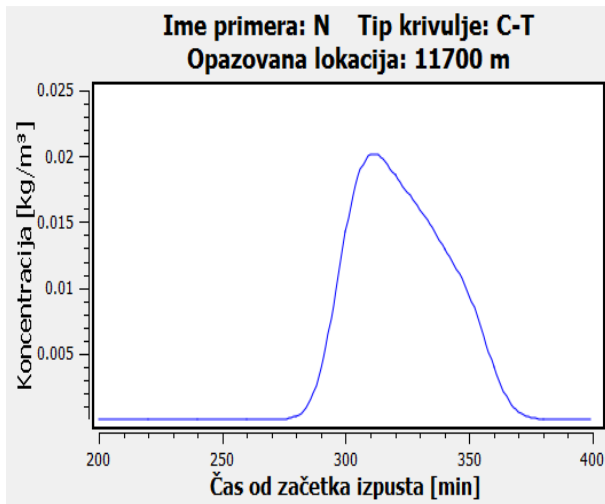
Table 1: Input data for two segments of Kolpa river: (a) from the tourist camp Podzemelj to the confluence of Kolpa and Lahinja rivers and (b) from the confluence to the border with Croatia. Abbreviations are described in section 3.1.

Veličina	Enota	Odsek (a)	Odsek (b)
L	[m]	4800	11700
Z _{zgoraj}	[m.n.m]	135	133
Z _{spodaj}	[m.n.m]	133	127
Q _{st}	[m ³ /s]	63,3	75,0
n _G	[s m ^{-1/3}]	0,045	0,045
m	[-]	2	2
b	[m]	62	70



Slika 7: Rezultati računskega primera: krivulja c-t za tok onesnaženja od kampa Podzemelj do sotočja Kolpe in Lahinje. V spodnjem oknu program izpiše izračunane parametre.

Figure 7: Results of the case study: c-t curve showing the propagation of the pollutant from the tourist camp Podzemelj to the confluence of Kolpa and Lahinja rivers. In the lower window all computed parameters are shown.



Slika 8: Rezultati računskega primera: krivulja *c-t* za tok onesnaženja od sotočja Kolpe in Lahinje do hrvaške meje.

Figure 8: Results of the case study: *c-t* curve showing propagation of the pollutant from the confluence of Kolpa and Lahinja rivers to the border with Croatia.

Navedimo še primer uporabe programa Siporek. Predpostavimo, da je v kampu Podzemelj ob reki Kolpi prišlo do nesreče: v eni uri je v reko izteklo 4500 kg kurilnega olja. V prvih 20 min je v vodotok izteklo 2000 kg olja, v naslednjih 20 min ga je izteklo 1500 kg in v zadnjih 20 min še 1000 kg. Zanima nas, kako dolgo bo onesnaženje potovalo najprej do sotočja z reko Lahinjo, zatem pa še do hrvaške meje (slika 6).

Geodetske vhodne podatke najhitreje dobimo iz satelitskih posnetkov (Google Zemlja), podobno velja tudi za podatke o geometriji struge in hidravlične parametre. Podatke o (trenutnem) pretoku poiščemo na spletni strani ARSO (ARSO, 2014). Vse potrebne vhodne podatke prikazujemo v preglednici 1.

Ker nas zanima čas potovanja od začetne do končne točke odseka, uporabimo krivuljo *c-t*. Rezultati so prikazani na slikah 7 in 8.

5. ZAKLJUČEK

Siporek je preprost in uporaben program. Zasnovali smo ga z namenom, da bi tistim, ki odločajo o ukrepih v primerih razlitij nevarnih

snovi, kar se da olajšali delo, ko gre zares. Ker je v takih primerih potrebno reagirati zelo hitro, je Siporek namenoma preprost, hiter in enostaven za uporabo. Ker pri prvih ukrepih po razlitjih nevarnih snovi sodelujejo predvsem GEŠP-i in druge organizacije, ki niso neposredno usposobljene za delo s strokovnimi računalniškimi programi, smo se pri razvoju programa potrudili uporabniški vmesnik za vnos vhodnih podatkov čim bolj poenostaviti. V okviru projekta 'Študija učinkovite uporabe vodnih baraž - OCV' (Četina et al., 2012) smo večino potrebnih vhodnih podatkov za račun toka onesnažil po slovenskih rekah pripravili vnaprej; hrani jih URSZR, ki v primerih razlitij nevarnih snovi vodi ukrepe.

Čeprav je Siporek primarno namenjen hitrim ukrepom v primerih razlitij nevarnih snovi, menimo, da je zaradi preprostosti in transparentnosti uporaben tudi kot študijsko gradivo. Zato upamo, da bo našel pot do kar se da širokega kroga uporabnikov.

Viri

Al-Rabeh A.H., Lardner R.W., Gunay N. (2000). Gulfspill Version 2.0: a software package for oil spills in the Arabian Gulf. *Environmental Modelling & Software* 15, 425–442.

ARSO, Agencija RS za Okolje (2014). Dostop do podatkov o vodah v Sloveniji. Dostopno na spletu: <http://vode.arso.gov.si/> (pridobljeno 18. 6. 2014).

Belleudy P. (2000). Restoring flow capacity in the Loire River bed. *Hydrological Processes* 14, 2331–2344.

Chow V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, 680 p.

Četina M., Banovec P., Fesl M., Cerk M., Cilenšek A., Sirnik N., Džebo E. (2012). *Študija učinkovite uporabe vodnih baraž-OCV*. Tehnično poročilo. Univerza v Ljubljani, FGG, 105 p.

Đurović B., Mikoš M. (2004). Preventivno obvladovanje tveganj zaradi naravnih nevarnosti – postopki v alpskih državah in Sloveniji. *Acta hydrotechnica*, 22(36), 17–35.

Fischer H., List E., Koh R., Imberger J., Brooks N. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press Inc, 483 p.

Geopedia (2013). Dostopno na spletu: <http://www.geopedia.si/> (pridobljeno 3. 6. 2014).

Google Earth (2013). Dostopno na spletu: <http://www.google.com/earth/index.html/> (pridobljeno 14. 11. 2012).

HEC-RAS, US Army Corps of Engineers (2013). Dostopno na spletu: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> (pridobljeno 6. 6. 2014).

Lehr W.J., Fraga R.J., Belen M.S., Cekirge H.M. (1984). A new technique to estimate initial spill size using a modified Fay-type spreading formula. *Marine Pollution Bulletin*, **15**, 326–329.

Mackay D., Paterson S., Nadeau S., (1980). Calculation of the evaporation rate of volatile liquids. Proceedings of the 1980 National conference on control of hazardous material spills, Louisville, Kentucky, 361–368.

Pestotnik S., Hojnik T., Šraj M. (2012). Analiza možnosti uporabe distribuiranega dvodimenzijskega modela Flo-2D za hidrološko modeliranje. *Acta hydrotechnica*, **25(43)**, 85–103.

Rajar R., Širca A., Četina M., Steinman F., Žagar D. (1994). *Matematični model za simulacijo širjenja nafte in procesov ob razlitju polutantov v površinskih vodah - 2. del: Enodimenzionalni model za simulacijo širjenja nafte in polutantov v rekah*. Tehnično poročilo. Univerza v Ljubljani, FGG, 19 p.

Rak G. (2006). Uporaba prostorskih podatkov v analizi hidravličnih lastnosti vodotokov (Using spatial data in open channel hydraulic analysis). Unpublished Bachelor Thesis, Univerza v Ljubljani, FGG, 81 p.

Razlitje, Spletna aplikacija za učinkovito uporabo vodnih baraž (2012). Dostopno na spletu: <http://www.vokas.razlitje/> (pridobljeno 5. 12.2012).

Shen H., Yapa P., Wang D., Yang X. (1991). *A mathematical model for oil slick transport and mixing in rivers*. Tech. Report No 91-1, Department of Civil and Environmental Engineering, Clarkson University, Potsdam.

Steinman F. (1999). *Hidravlika*. Univerza v Ljubljani, FGG, 295 p.

Širca A., Rajar R. (1997). SIPOR – program za brzo prognozo rasprostiranja polutanata u rijekama. *Vodoprivreda* **1**, 17–25 (in Serbo-Croatian).

Širca A., Rajar R., Četina M. (1994). SIPOREK – Program za hitro oceno onesnaženja v vodotokih ob morebitnih razlitjih. Mišičev vodarski dan '94: Ukrepi za varovanje voda pred onesnaženjem, 64–69.