

OBČUTLJIVOSTNA ANALIZA PARAMETROV MODELIRANJA PRVEGA VALA ONESNAŽENIH VODA S CESTNIH POVRŠIN

A SENSITIVITY ANALYSIS MODELING PARAMETERS OF THE FIRST WAVE OF POLLUTED WATER FROM ROAD SURFACE

asist. dr. Mario Krzyk, univ. dipl. inž. grad.

mario.krzyk@fgg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Jože Panjan, univ. dipl. inž. grad.

joze.panjan@fgg.uni-lj.si

UL FGG, Inštitut za zdravstveno hidrotehniko

Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 628.196:656.13

Povzetek | Onesnažene vode s cest vsebujejo velike količine anorganskih in organskih onesnažil. Njihov izvor je v disperznih virih na sami površini cestišča in v točkovnih izvorihi. Konične koncentracije onesnažil v padavinski odpadni vodi se pojavijo v začetni fazi padavin kot prvi val onesnaženja. Teoretično in praktično ga danes izražamo z izrazom kritični naliv. Modeliranje prvega vala je zahtevno, saj se lahko obravnava do 30 parametrov oziroma spremenljivk. Večina modelov uporablja razmerje masnih emisij kot vodilne enačbe in izraža koncentracije ali kopičenje onesnažil kot funkcijo časa. Spremenljivke so odvisne od volumna odтока, intenzitete padavin, intenzitete prometa, predhodnih sušnih dni, rabe tal in drugih parametrov. V članku obravnavamo občutljivostno analizo za nekatere parametre – kot so α koeficient delnega odтока, β^* , ki se nanaša na padavine, γ^* , ki poveča končen preostanek koncentracije onesnažil, in δ kot začetna koncentracija –, ki vplivajo na koncentracijo onesnažila na cestnih površinah.

Ključne besede: ceste, kritični naliv, prvi val, odvodniki, koncentracije, onesnažila

Summary | Polluted water from roads contains large amount of inorganic and organic pollutants. Their origin is in the dispersed sources on the surface of the road itself and in local origins. Peak concentrations of pollutants in stormwater effluent occur in the initial stage of precipitation known as the "first wave". Theoretically and practically it is expressed as critical rainfall. Modeling of the first wave is difficult because it can deal up to 30 parameters, ie. variables. Most of the models use mass emission rate as the governing equation and express concentration or accumulation of pollutants as a function of time. Variables depend on the volume of runoff, precipitation intensity, the intensity of traffic, the previous dry days, the land use and other parameters. In this paper sensitivity analysis for some parameters, such as coefficient α partial outflow, β^* relating to rainfall, which increases γ^* remainder of the final concentration of pollutants δ as initial concentration and affecting concentration of pollutants are considered.

Key words: roads, critical rainfall, the first wave, surge, concentrations, pollutants

1 • UVOD

Prvi val onesnaženja oziroma čistilni val s cestnih površin je odtok ob začetku zelo intenzivnih nalivov. Padavinska voda izpere največji del onesnaženja, ki se je (na)kopičilo v času sušnega vremena, v jeseni tudi zaradi vegetacijskega odmiranja, spomladi pa tudi zaradi cvetenja (pelod), pozimi in v zgodnji pomladi zaradi posipavanja in soljenja cestišč. Največji vzroki za onesnaženje so torej zaradi: prometa – normalna obraba cestišč, gum in zavor (obrus), naftni derivati, soljenje cestišč v času zmrzovanja, težke kovine, nesnaga voznikov (predvsem organska), vegetacije – listje, pelod idr. V odtoku prvega vala se izprana zračna in površinska nesnaga (pesek, olja, smeti, kemikalije, kovine idr.) s cest, parkirišč in urbanih površin pojavijo v zelo visokih koncentracijah. Koncentracije onesnažil v začetnem odtoku so mnogo večje v primerjavi z odtokom, ki sledi. Prvi val onesnaženja je definiran po različnih avtorjih takole:

- z uporabo statističnih metod, ki vključujejo mnogokratni regresijski model, je prvi val velikega onesnaženja, omejen na prvih 20 % odtoka (Deletic, 1998),
- to je najmanj 80 % nakopičenih onesnažil, prisotnih v prvih 30 % odtočnega volumna (Bertrand-Krajewski, 1998),
- to so nakopičene koncentracije onesnažil v padavinskem odtoku, ki se pojavijo na začetku padavinskega dogodka, ki traja od 5 do 15 minut (Panjan, 2001).

Problematika bo obravnavana v dveh člankih, v prvem bodo podana teoretična izhodišča in občutljivostna analiza parametrov prvega vala onesnaževanja, v drugem pa večletne meritve in primerjave koncentracij onesnažil na cestišču, v kanalu in odvodniku na isti lokaciji naselja v različnih letnih obdobjih.

Lovljenje in čiščenje onesnaženih padavinskih voda izključno s cestnih površin v Nemčiji urejajo smernice za odvodnjavanje cestišč RAS – Ew »Richtlinie für die Anlage von

Straßen, Teil Entwässerung« (Maleiner, 2005). Z rahlim medsebojnim odstopanjem se bazeni za čiščenje deževnice lahko dimenzionirajo tudi po delovnih poročilih ATV – AG 1.3.2: »Behandlung des Regenabflusses beim Trennverfahren« (1980).

Zanima nas predvsem masna bilanca snovi prvega vala onesnaženja in celotnega padavinskega dogodka najpomembnejših onesnažil, da bomo lažje v skladu s predpisi ugotavljali obremenitve vodotokov in njihovo zaščito, na primer z zadrževalnimi bazeni.

Računalniški modeli prvega vala onesnaženja za ugotavljanje masnih bilanc se razvijajo šele v zadnjih treh desetletjih. Pri tem pa se upoštevajo temeljni principi odvodnje cest, osnovna hidrološka in hidravlična načela odvodnje avtocest ter kriteriji za kvalitetno odvodnjavanje in čiščenje padavinskih voda s cest oziroma njihovega izpuščanja v odvodnike – recipiente, tako z vidika emisij kot imisij. Za ovrednotenje vplivov prvega vala so pogosto uporabljeni modeli za napovedovanje koncentracij, kot so regresijski modeli, stohastični in deterministični simulacijski modeli (Menganiet, 2005).

2 • PRISTOPI REŠEVANJA

Za simulacijo prvega vala smo uporabili hidravlični in kakovostni model **SWMM** (Storm Water Management Model) (Rossman, 2005), za zadrževanje onesnaženih voda pa nemške smernice ATV (Abwasser Technische Vereinigung) 128 E. SWMM-model je eden od najbolj uporabljenih matematičnih modelov v slovenski praksi dimenzioniranja kanalizacijskih sistemov. To je časovno odvisni simulacijski model. Uporablja načela ohranitve mase, energije in gibalne količine. Program uporablja različne metode preračuna količinskega in kvalitativnega odtoka za naslednje fizikalne procese: površinski odtok, infiltracija, podtalnica, taljenje snega, transport toka, površinsko zbiranje vode, transport onesnažil itd. (Rep, 2007).

Program ima možnost analize samega kopičenja onesnažil kot tudi izpiranje, transport in obravnavo kakršnegakoli števila onesnažil. Predpostaviti oziroma podati pa moramo naslednje:

1. onesnažilo, ki bo analizirano,

2. definirati različne kategorije rabe tal, kjer se ustvarja podano onesnažilo,
3. podati parametre funkcije kopičenja in izpiranja, ki določijo kvaliteto odtoka iz posamezne kategorije rabe tal, in določiti mešanico rabe tal za posamezno prispevno območje, na primer urbana področja, prometna, kmetijska (njive, travniki ...) idr.

Za koeficient odtoka in posameznega onesnažila moramo podati ime onesnažila, uporabljene enote za koncentracijo posameznega onesnažila (mg/l, µg/l ...) v padavinski onesnaženi vodi, podzemne vode idr. S programom lahko določimo t. i. kopolutante (ang. Co-pollutants), kar pomeni naslednje: onesnažilo X lahko ima kopolutant Y, zato je pri vsebovani koncentracijski vrednosti X v odtoku prisotna tudi določena fiksna frakcija koncentracijske vrednosti Y.

V primeru večjega števila onesnažil mora uporabnik za vsakega od teh določiti njegove karakteristike kopičenja. Za vsako posamezno

onesnažilo je treba določiti tudi t. i. začetno kopičenje, ki je izprano med padavinskim dogodom. To je lahko določeno na dva možna načina:

- določitev števila predhodnih sušnih dni,
- neposredna določitev začetne nakopičene mase na vsakem prispevnem območju.

Kopičenje onesnažil, ki se akumulirajo znotraj posamezne prispevne površine, je opisano kot masa (kg) na enoto prispevne površine (ha) in enoto volumna (l), za metrične (EU) enote (v programu so podane tudi ZDA enote) (Stenstrom, 2005). Količina nakopičenih onesnažil je tako funkcija predhodnega sušnega obdobja in je lahko izračunana z izborom ene od spodnjih funkcij:

Kopičenje onesnažil (B) je odvisno od časa (t), ki raste do neke vrednosti, do nekega maksimalnega limita (glej preglednico 1):

$$B = \text{Min}(C_1, C_2 t^{C_3}) \quad (1)$$

kjer pomenijo:

- t – čas (sušni dnevi) (min)
- C₁ – maksimalno možno kopičenje (kg/ha),
- C₂ – konstantna vrednost kopičenja (l/dan)
- C₃ – časovni eksponent.

Kopičenje največkrat sledi eksponentni rasti krivulje, ki se asimptotično približuje maksimalnemu limitu:

$$B = C_1(1 - e^{-C_2 t}) \quad (2)$$

Kopičenje se začne z linearno vrednostjo, ki se s časom odklanja, dokler ni dosežena vrednost saturacije,

$$B = \frac{C_1 t}{C_2 + t} \quad (3)$$

kjer pomenita:

C_1 – maksimalno možno kopičenje (kg/ha),
 C_2 – polovična (razpolovna) saturacijska konstanta (dnevi, ki so potrebni za doseg polovične vrednosti maksimalnega kopičenja) (min).

V primeru večjega števila onesnažil moramo, tako kot pri sami določitvi kopičenja, za vsakega od teh določiti njegove karakteristike izpiranja.

Izprana onesnažila (s prispevnih površin ali iz kanalizacijskega sistema) (W – (mg,µg/h)) so proporcionalna produktu eksponentne funkcije odtoka, ki se večja do neke vrednosti in vrednosti manjkajočih nakopičenih onesnažil:

$$W = C_1 q^{C_2} B, \quad (4)$$

kjer pomeni:

C_1 – koeficient izpiranja (-),
 C_2 – eksponent izpiranja (-),
 Q – odtočna vrednost na površino (mm/h),
 B – nakopičena onesnažila (kg/ha).

Izpiranje po vrednostni krivulji (Rating Curve Washoff)

Vrednost izprane mase onesnažil W je proporcionalna z odtočno vrednostjo, ki raste do neke meje:

$$W = C_1 Q^{C_2}, \quad (5)$$

kjer pomenita:

C – koncentracijo (mg/l),
 Q – odtočno količino (l/s).

Srednja koncentracijska vrednost dogodka

(Event Mean Concentration – EMC je C_{EM}) Gre za poseben primer krivulje vrednosti odtoka, kjer je eksponent enak 1 in koeficient C_1 predstavlja koncentracijo izpranih onesnažil (mg/l).

Treba je opozoriti, da se v vseh primerih kopičenje posledično zmanjša s pričetkom procesa izpiranja, kakor se tudi izpiranje prekine, ko nakopičenih snovi ni več na voljo.

Poimenski prikaz funkcij kopičenja onesnažil v programu SWMM je podan v preglednici 2.

Vsaka funkcija izpiranja izraža rezultate v svojih enotah. Pri eksponentni funkciji je odtok izražen v višini na časovno enoto (mm/h), medtem ko je pri vrednostni krivulji odvisno, katere merske enote je uporabnik programa določil na začetku dela s podprogramom (CFS, CMS itd.). Parameter kopičenja pri eksponentni funkciji predstavlja »tekoče« kopičenje na prispevnih površinah v masnih enotah. Enote, v katerih je izražen koeficient C_1 , so (mm/h)^{C2} na uro. Pri vrednostni krivulji je enota koeficienta C_1 odvisna od izbranih merskih enot. Funkcija srednje koncentracijske vrednosti pa ima izražen

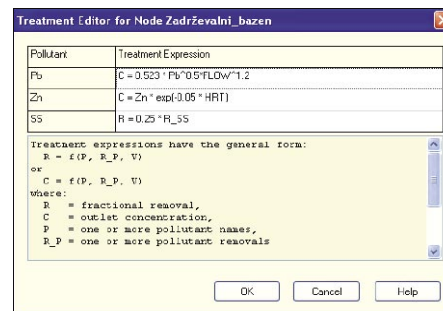
koeficient C_1 vedno v koncentracijskih enotah (Kim, 2004).

Čiščenje

Čiščenje določa v SWMM stopnjo odstranjevanja določenega onesnažila v kateremkoli vozlišču odvodnega sistema. Funkcijo stopnje odstranjevanja onesnažila določi uporabnik programa sam z matematičnim izrazom oziroma kompletom funkcij.

Komplet funkcij je mišljen kot kakršenkoli dobro zasnovan izraz za posamezno onesnažilo, ki vsebuje:

- koncentracijo onesnažil vseh tokov, ki vstopijo v neki požiralnik ali jašek, (uporaba imena, ki predstavlja koncentracijo nekega onesnažila),
- odstranitev drugih onesnažil (uporaba predpone R_ pred onesnažilom, kar predstavlja odstranitev),
- katerokoli od naslednjih spremenljivk:
 - (v)tok Q_i – za vrednost vtoka v sam jašek (l/s),
 - globino h – za globino vode nad vozliščem (m),
 - območje F_i – za prispevno območje, ki pripada nekemu jašku (m²),
 - DT – za časovne korake izračuna (s),
 - HRT – za hidravlični zadrževalni čas (h).



Slika 1 • Primer zapisa funkcije stopnje odstranjevanja onesnažil

Rezultat t. i. čiščenja je lahko koncentracija (C) ali pa frakcijska odstranitev (R). Kot primer prvostopenjskega izraza za BPK (KPK), ki izteka iz zadrževalnega bazena, je enačba 6:

– **koncentracija:** npr.: prvostopenjska funkcija

$$C = BPK \cdot \exp(-0.05 \cdot HRT) \quad (6)$$

– oziroma **odstranitev onesnažil v sledih:** npr.: odstranitev svinca predstavlja 25 % odstranitve SS

$$R = 0.75 \cdot R_SS \quad (7)$$

Ime	Funkcija	Enačba
POW	Moči (Power)	$Min(C_1, C_2 * t^{C_3})$
EXP	Eksponentna (Exponential)	$C_1 * (1 - \exp(-C_2 * t))$
SAT	Zasičenja (Saturation)	$C_1 * t / (C_3 + t)$

Preglednica 1 • Pregled funkcij kopičenja onesnažil (t predstavlja št. predhodnih sušnih dni)

Ime	Funkcija	Enačba	Enote
EXP	Eksponentna (Exponential)	$C_1(\text{odtok})^{C_2}(\text{kopičenje})$	Izprana masa/h
RC	Vrednostna krivulja (Rating Curve)	$C_1(\text{odtok})^{C_2}$	Izprana masa/s
C_{EM}	Srednja koncentracijska vrednost (Event Mean Concentration)	C_1	Izprana masa/l

Preglednica 2 • Pregled funkcijskih enačb za izpiranja onesnažil

Samo čiščenje je lahko uporabljeno na vsakršni kategoriji rabe tal za periodično zmanjšanje nakopičenih onesnažil. Parametri, ki opišejo čiščenje, so:

- čas med zaporednimi čiščenji,
- čas, ki je pretekel od zadnjega čiščenja do začetka simulacije,
- frakcije vseh nakopičenih onesnažil, ki so na voljo za samo redukcijo s čiščenjem,
- frakcije posameznih nakopičenih onesnažil, ki so reducirana s čiščenjem.

Račun hidravličnih parametrov v kanalizacijskem sistemu

Za račun transporta vode po kanalih in ceveh lahko v programu SWMM izbiramo med tremi različnimi vrstami pristopov:

- dinamični tok (tok z dinamičnim valom),
- kinematični tok (tok s kinematičnim valom),
- stalni tok.

Z uporabo **dinamičnega vala** za transport vode po kanalih rešuje SWMM popolne Saint-Venantove enačbe za enodimenzijski nestalni neenakomerni tok. Te enačbe sestojijo iz kontinuitetne in dinamične enačbe za kanale, ki jih SWMM rešuje z uporabo Picardove iteracije (metoda zaporednih približkov) in iz prostorninske kontinuitetne enačbe za vozlišča.

Kontinuitetna enačba za posamezni kanal:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

Dinamična (momentna) enačba za posamezni kanal:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + g \cdot A \cdot I_t + g \cdot A \cdot h_L = 0 \quad (9)$$

Oznake v zgornjih enačbah pomenijo:

- x – stacionaža (m),
- t – čas (s),
- A – površina omočenega oboda v prečnem prerezu (m^2),
- Q – pretok (m^3/s),
- g – gravitacijski pospešek, ki znaša $9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$,
- H – hidravlična višina vode v kanalu (višina gladine + morebitna tlačna višina) (m),
- I_t – padec energijske črte zaradi trenja (trenjske izgube) (m/m),
- h_L – lokalne energijske izgube (m/m).

Trenjske izgube I_t preračuna program iz Manningove enačbe:

$$I_t = \frac{n_g^2 \cdot v^2}{k^2 \cdot R^{4/3}} \quad (10)$$

Oznake pomenijo:

- k – koeficient (-) ($1,0$ za metrične enote in $1,49$ za ameriške enote),
- n_g – Manningov koeficient hrapavosti kanala, katerega tipične vrednosti so v priročniku SWMM 5 (Rossman, 2005) ($sm^{-1/3}$),
- v – hitrost toka po kanalu (m/s),
- R – hidravlični radij (m).

Za reševanje transporta vode med kanalom in vozliščem uporablja SWMM dodatno kontinuitetno enačbo za vozliščne spoje, ki povezujejo dva kanala ali več kanalov med seboj. SWMM predvideva zvezno gladino vode med gladino v kanalu in gladino v vozlišču, ki je povezano s kanalom (izjema je pojav prostega pada v primeru, da je kota dna cevi višja od gladine vode v jašku).

Sprememba hidravlične višine v odvisnosti od časa v vozliščnem spoju:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q}{A_{store} + \sum A_S} \quad (11)$$

kjer so:

- A_{store} – florisna površina gladine vode v vozlišču (m^2),
- $\sum A_S$ – florisna površina gladine vode v kanalu, ki je povezan z vozliščem (m^2),
- $\sum Q$ – pretok skozi vozlišče (vtok – iztok), ki ga prispevajo vsi kanali, povezani z vozliščem, vključno z vsoto vseh zunanjih vtokov v vozlišče (l/s).

S temi enačbami (kontinuitetne in dinamične) lahko program simulira dinamični tok pod tlakom, povratni tok, skladiščenje (akumulacijo) vode v KS, iztok vode iz KS (preplavitev), tok skozi zankaste povezave in tok izpod zapornic, tok skozi bazene, razbremenilnike, črpališča in odprtine ter preko prelivov. Za izračun po navadi uporabimo krajše časovne korake (5 do 60 s) (Rutar, 2008).

Tok vode z uporabo **kinematičnega vala** rešuje SWMM s poenostavljeno obliko dinamične enačbe za posamezni kanal. Pri tem upošteva, da je padec gladine vode v kanalu enak padcu dna kanala. Največji možni pretok skozi kanal je rezultat Manningove enačbe za polni prežet cevi:

$$Q = k \cdot \frac{\sqrt{I}}{n_g} \cdot A \cdot R^{2/3} = k \cdot \frac{\sqrt{I}}{n_g} \cdot \frac{A^{5/3}}{O^{2/3}} \quad (12)$$

Oznake v zgornji enačbi:

- I – padec kanala (m/m),
- A – površina prečnega prereza cevi (m^2),
- O – omočeni obod (m).

Program z uporabo kinematičnega vala ne more simulirati povratnega toka in toka pod pritiskom, prav tako je omejen na nerazvezane povezave (na vozlišče sta lahko vezana le dva kanala: vtočni in iztočni). Numerično stabilnost lahko ohranja z daljšimi časovnimi koraki (5 do 15 min.). Simulacije, pri katerih za izračun ni potrebna uporaba krajših časovnih korakov, so lahko z uporabo kinematičnega vala zelo učinkovite, predvsem to velja za dolgoročne simulacije.

Uporaba **stalnega toka** predstavlja najenostavnejšo metodo transporta vode. SWMM predvideva, da je tok ves čas stalen in enakomeren. Tako za transport vode po kanalu prenese vtočni hidrogram iz gorvodnega dela kanala do dolvodnega konca brez zadrževanja ali spremembe v obliki. Za preračun pretoka uporablja Manningovo enačbo (10). Z izbiro stalnega toka program simulira le stalni enakomerni tok skozi nerazvezane povezave. Takšen model lahko uporabljamo le za predhodne analize.

Pri transportu onesnažil skozi kanalizacijski sistem se vsak posamezni kanal v SWMM obravnava kot popolnoma premešan pretočni reaktor (continuously stirred tank reactor), čeprav, realno gledano, kanal po obliki bolj spominja na cevni reaktor (plug flow reactor).

Prav tako za transport onesnažil v SWMM delujejo akumulacijska vozlišča. Za vsa druga vozlišča, za katera SWMM predvideva, da nimajo volumna, je v kvalitativnem pogledu iztok iz vozlišča enostavno mešanica koncentracije onesnažil vseh vtokov v vozlišče.

Osnovna enačba masne bilance popolnoma premešanega pretočnega reaktorja je (Panjan, 2001):

$$\frac{d(VC)}{dt} = I(t) \cdot C^I(t) - O(t) \cdot C(t) - K \cdot C(t) \cdot V(t) + \frac{L(t)}{t} \quad (13)$$

Oznake v zgornji enačbi:

- V – prostornina reaktorja (kanala ali akumulacijskega vozlišča) (l),
- C^I – koncentracija onesnažila v vtoku (mg/l),

C – koncentracija onesnažila v reaktorju in iztoku (mg/l),
 I – vtok (l/s),
 O – iztok (l/s),
 t – čas (s),
 K – konstanta razpada onesnažila (s^{-1}),
 L – zaloga onesnažil v reaktorju (akumulaciji) (mg).

Večina modelov uporablja razmerje masnih emisij kot vodilne enačbe in izraža koncentracije ali kopičenje onesnažil kot funkcijo časa. Spremenljivke so po navadi odvisne od volumna odtoka, intenzitete padavin, intenzitete prometa, predhodnih sušnih dni, izrabe tal in drugih parametrov. Vplivne faktorje na spremenljivke je težko določiti, ker obstaja veliko različnih specifičnih pogojev, kot so prisotnost ali odsotnost čiščenja cestišč, solna zasičenost tal ob cestišču, smer vetra ... Statistični regresijski modeli so zato ocenjeni kot specifični in nejasni v napovedovanju dogodkov, ki sledijo.

Število parametrov modela se obdrži, kolikor je le mogoče nizko (zaradi nujnosti številnih poenostavitvev in omejitev) glede na bistvene pogoje raziskave. Model naj izpolnjuje zahteve:

- izvedbo simulacije s splošno dostopnimi vhodnimi parametri,
- parametri modela naj temeljijo na fizikalnih parametrih.

V preglednici 3 so prikazane spremenljivke, ki so najpomembnejše pri modelu odtoka posameznega onesnažila.

Model(i) naj zajame(jo) naslednje štiri osnovne procese, če želimo, da je kakovost iztoka padavinske vode v odvodni sistem zadovoljivo simulirana:

- akumulacijo nečistoč na površinah območja v odvisnosti od njihove produkcije (atmosferska imisija in produkcija na površinah) in njihove izgube (odnašanje z vetrom in čiščenje cestišč),
- možne medsebojne reakcije nečistoč s padavinami,
- vnos in iznos snovi s padavinskimi vodami s površin,
- transport nečistoč v odvodni sistem z upoštevanjem njihovega odlaganja, izpiranja in usedanja.

Tako lahko model(e) razdelimo v tri stopnje:

- K prvi stopnji prištevamo zelo enostavne modele povprečnih količin onesnažil (prva ocena), ki zahtevajo malo vhodnih podatkov. Njihov osnovni namen je izračun dolgoročnega povprečja (na primer povprečen volumen vala onesnaževanja in vsebnost polutantov). Ugotovitve so primerne za lociranje problematičnih območij in predlaganje strategij za izboljšavo. Primer modela je osnovna prva verzija SWMM I.
- K drugi stopnji prištevamo računalniško podprte modele, ki omogočajo prikaz hidrografov in polutografov v eni oziroma le v nekaj točkah, ter omogočajo enostavno spremljanje prvega vala in polutantov. Ti modeli so po navadi zasnovani za simulacijo obnašanja odvodnega sistema skozi daljša obdobja in omogočajo

uporabniku ugotoviti karakteristike valov skozi daljša načrtovana obdobja. Primer te vrste modela sta STORM (Corps of Engineers Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model) in HSPF (Hydrological Simulation Program).

- K tretji stopnji pa prištevamo modele, ki so sposobni voditi tokove skozi zaprte in odprte kanale, kanalizacijo in žlebove, prav tako pa definirati hidrografe ter polutografe na različnih lokacijah. Med najbolj znane modele štejemo zadnjo verzijo SWMM (the EPA Storm Water Management Model) skupaj z modelom kakovosti odpadne vode QQD (the Quantity-Quality Simulator).

V prispevku nas najbolj zanimajo masna bilanca onesnažil za račun koncentracije onesnažil kot del programa SWMM in dimenzioniranje zadrževalnih bazenov deževnih voda za zadrževanje prvega vala onesnaženja po ATV-A 128E predpisih.

Model masne bilance

Model napoveduje koncentracijo kopičenja onesnažil in določa povprečne vrednosti koncentracije onesnažil, C_{EM} , pred padavinskim dogodkom. Kot vemo, se trajanje padavinskega dogodka spreminja, kar otežuje napovedovanje koncentracij kot funkcijo časa. Zato se model rešuje z uporabo normaliziranega kumulativnega odtoka.

Vpliv onesnažil na vodno telo je lahko povzročen tako z raztapljanjem kot tudi z izpiranjem.

Kopičenje lahko pomeni bodisi celotno maso M v določenem volumnu V :

Onesnažilo	Trajanje naliva	Volumen naliva	Intenziteta naliva	Promet med nalivom	Trajanje predhodnega sušnega obdobja	Predhodno število vozil	Trajanje predhodnega naliva	Volumen predhodnega naliva	Intenziteta predhodnega naliva
lebdeče snovi		*	*		*				*
KPK	*	*	*		*	*			
BPK5		*	*	*		*			
Nitrat		*	*	*		*			
P	*	*	*			*			
Fe		*	*		*				
Zn	*	*				*	*	*	*
Svinec		*	*	*					*
Baker	*	*							

Preglednica 3 • Spremenljivke, ki vplivajo na kopičenje onesnažil v odtoku (Mlakar, 2007)

$$M = C \cdot V \quad (14)$$

bodisi masni tok L:

$$L = C \cdot Q \quad (15)$$

Nas zanimajo tudi masno-prostorninska razmerja prvega vala (MFF – mean first flow):

$$M_{FF} = \frac{\int_0^{t_1} C(t)Q(t)dt}{\int_0^{t_1} Q(t)dt} = \frac{\int_0^{t_1} C(t)Q(t)dt}{\frac{M}{V}} \quad (16)$$

Izračun je lahko predstavljen tako, da je izprana masa ovrednotena v vsaki časovni točki dogodka.

Srednjo koncentracijo onesnažil (Event Mean Concentration – EMC = C_{EM}) izrazimo:

$$C_{EM} = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t C(t) \cdot Q(t)dt}{\int_0^t Q(t)dt} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot C_i \cdot \Delta t}{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot \Delta t} \quad (17)$$

Kjer pomenijo:

- M – masa onesažila med padavinskim dogodkom (mg),
- C – koncentracija onesažila (mg/l),
- V – celotni padavinski odtok med padavinskim dogodkom (m^3),
- Q – pretok (l/s),
- L – masni tok onesažila (kg/s),
- M_{FF} – razmerje masnega prvega vala (-),
- C_{EM} – srednja koncentracija onesažila (mg/l),
- t – čas (min),
- t_1 – delni čas v padavinskem dogodku (min),
- C_t – koncentracija, ki je reprezentativna v času vzorčenja »i« (mg/l),
- Q_t – odtok, ki je reprezentativen v času vzorčenja »i« (m^3 /min.),
- i – vzorčno zaporedje (-),
- Δt – časovni interval za reprezentativno vzorčenje (min.),
- n – število zajetih vzorcev (-).

Ena ključnih težav pri definiranju srednje koncentracije onesažil (C_{EM}) je, kako izraziti in ovrednotiti koncentracijo onesažil. Po navadi so stroški tisti, ki preprečijo ustrezno število merjenj $C(t)$ v frekventnih intervalih, zato je odvzeto manjše število vzorcev. Padavine ali padavinski odtok so po navadi merjeni

samodejno, posneti v intervalih od 1 do 5 min. Celotna masna emisija pa je produkt padavin, prispevne površine, odtočnega koeficienta in koncentracij C_{EM} ter časa. C_{EM} pa ne prispeva informacij o časovnih spremembah koncentracij onesažil ali masnih emisijah, ki so pogosto pomembni za razvoj sunkovitega masnega kopičenja v prvem valu. Masno kopičenje se določi kot produkt med odtočnim volumnom in koncentracijo za:

Letno masno kopičenje = povprečno dogodkovno masno kopičenje x število padavinskih dogodkov v posameznem letu

Povprečno dogodkovno kopičenje = povprečni odtočni volumen posameznega padavinskega dogodka x srednji C_{EM}

Masno kopičenje onesažil v odtoku se lahko izraža v različnih enotah: g/km (kanalizacijskega sistema)/leto ali g/m^2 (prispevne površine)/leto odtoka.

Izprana masa je razlika med celotno maso in preostalo maso. Mehanizem, ki vpliva na spremembe koncentracij v odtoku, vključuje razredčenje začetnih mas onesažil kot tudi sodelovanje mokrih odločkov med padavinskim dogodkom (Sharifi, 2011).

Odtočni delež je lahko opisan z enačbo (18):

$$\frac{d[C(t)]}{dt} = -\alpha \frac{Q(t) \cdot C(t)}{V_{TRu}} \quad (18)$$

Kjer so:

- α – koeficient delnega odtoka (-),
- $C(t)$ – koncentracija onesažil v času t ,
- V_{TRu} – celotni odtočni volumen = $\int_0^t Q(t)dt$ (m^3),
- T – čas trajanja naliva (min.).

Enačbo (18) preuredimo v:

$$\frac{d[C(t)]}{C(t)} = -\alpha \frac{Q(t)}{V_{TRu}} dt, \quad (19)$$

jo integriramo in dobimo:

$$\ln[C(t)] = -\alpha \cdot \frac{\int_0^t Q(t)dt}{V_{TRu}} + \ln(\beta), \quad (20)$$

kjer je β integracijska konstanta.

V enačbi (20) je začetna koncentracija pri $t = 0$: $\ln(C(t)) = \ln(\beta)$.

Z upoštevanjem je:

$$\frac{\int_0^t Q(t)dt}{V_{TRu}} = \frac{\int_0^t Q(t)dt}{\frac{M}{V}} = V_{nRu}(t) \text{ je:}$$

$$\ln[C(t)] = -\alpha \cdot V_{nRu}(t) + \ln(\beta). \quad (21)$$

$V_{nRu}(t)$ je normaliziran kumulativni volumen; $0 \leq V_{nRu}(t) \leq 1.0$

Enačba (21) z uporabo eksponenta postane:

$$C(t) = \beta \cdot \text{Exp}[-\alpha \cdot V_{nRu}(t)] \quad (22)$$

Koncentraciji, nastali med padavinskim dogodkom, dodamo še vpliv vozil, vpliv vnosa onesažil iz zraka in drugih vplivnih faktorjev s koncentracijskim izrazom (γ):

$$C(t) = \beta \cdot \text{Exp}[-\alpha \cdot V_{nRu}(t)] + \gamma \quad (23)$$

kjer je lahko koncentracija določena tudi iz emisijskega masnega deleža:

$$M(t) = C(t) \cdot Q(t) \quad (24)$$

kjer je $M(t)$ emisijski masni delež onesažila v času t .

$$C(t) = \frac{\Delta M(t)}{\Delta Q(t)} = \frac{\int_{t-1}^t M(t)dt}{\int_{t-1}^t Q(t)dt}$$

$$= \frac{\int_{t-1}^t M(t)dt}{\int_0^t Q(t)dt - \int_0^{t-1} Q(t)dt} \quad (25)$$

Označba enačbe (25) po integraciji postane:

$$\int_0^t Q(t)dt - \int_0^{t-1} Q(t)dt = [V_{nRu}(t) - V_{nRu}(t-1)] \cdot V_{TRu} \quad (26)$$

Razlika v dveh normaliziranih volumnih v časih t in $t-1$, ki je normalizirani tokovni delež za napoved, pa poda koeficient:

$$\beta_1 = \frac{[V_{nRu}(t) - V_{nRu}(t-1)]}{V_{nRu}(t)} \quad (27)$$

Z upoštevanjem enačbe (27) v enačbi (25) dobimo:

$$C(t) = \frac{1}{\beta_1 \cdot V_{nRu}(t)} \cdot \frac{\int_{t-1}^t M(t) dt}{V_{TRu}} \quad (28)$$

Normalizirani tokovni delež ne bo znan, če je model uporabljen za napovedovanje. Takrat je lahko ocenjen s predhodnim padavinskim dogodkom ali vremensko napovedjo, ki dovoljuje modelu, da je uporabljen za napovedovanje. Enačba (28) ima enoto (masa)/(volumen) oziroma koncentracija. Novi izraz koncentracije je ključ modela. Če upoštevamo $\frac{\int_{t-1}^t M(t) dt}{V_{TRu}} = C_{nk} = \text{Nova_koncentracija } [V_{nRu}]$, je lahko enačba (28) izražena kot:

$$C(t) = \frac{1}{\beta_1 \cdot V_{nRu}(t)} \cdot \{ \text{Nova_konc.} [V_{nRu}] \} = \frac{1}{\beta_1 \cdot V_{nRu}(t)} C_{nk} \quad (29)$$

Če izenačimo vrednosti enačb (23) in (29), dobimo:

$$\beta \cdot \text{Exp}[-\alpha \cdot V_{nRu}(t)] + \gamma = \frac{1}{\beta_1 \cdot V_{nRu}(t)} C_{nk} \quad (30)$$

Upoštevamo, da je nov model odtoka, izražen kot:

$$C_{nk} = \beta^* \cdot V_{nRu}(t) \cdot \text{Exp}[-\alpha \cdot V_{nRu}(t)] + \gamma^* \cdot V_{nRu}(t) \quad (31)$$

V enačbi (18) je parameter α uporabljen za opis začetnih pogojev, ki bi v idealnih razmerah bili povezani s predhodnim sušnim obdobjem. Nov model odtoka je končno podan kot:

$$C_{nk} = \delta + V_{nRu}(t) \cdot \{ \gamma^* + \beta^* \cdot \text{Exp}[-\alpha \cdot V_{nRu}(t)] \} \quad (32)$$

Nov model ima dva različna dela oziroma funkciji. Prvi je linearen, $\gamma^* \cdot V_{nRu}(t) + \delta$, drugi pa zavzema obliko tipa gama funkcije, $\beta^* \cdot V_{nRu}(t) \cdot \text{Exp}[-\alpha \cdot V_{nRu}(t)]$.

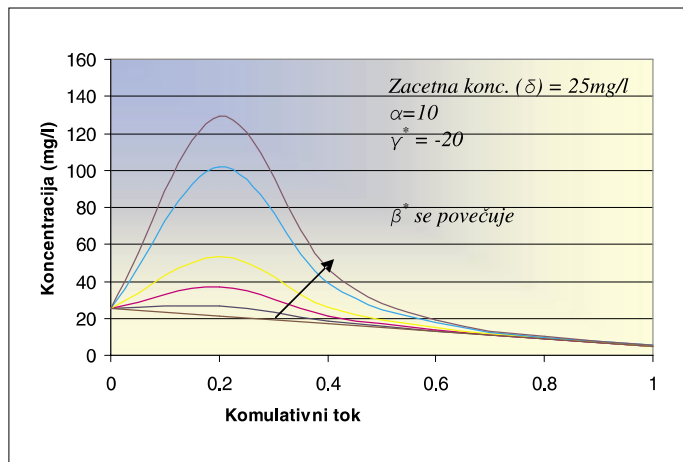
Za uporabo modela kot orodja za napovedovanje je nujno treba predvideti celotni odtočni volumen, ki mora temeljiti bodisi na vremenski napovedi bodisi na drugih informacijah. Enačba (32) ima štiri parametre, ki se navezujejo na predhodno sušno obdobje, intenziteto padavin in na odtočni koeficient. δ je začetna koncentracija, ki se nanaša na predhodno sušno obdobje. Parametra α in γ^* se nanašata na celotni odtok. β^* pa se nanaša na padavine, odtočni koeficient in trajanje padavinskega dogodka.

3 • OBČUTLJIVOSTNA ANALIZA PARAMETROV MODELA PRVEGA VALA

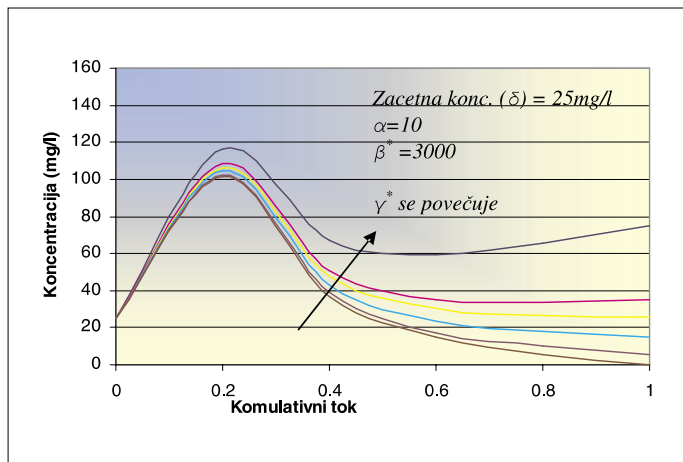
Občutljivostna analiza je predstavljena za definiranje občutljivosti (senzitivnosti) modela za štiri parametre. Model ima v primerjavi s prejšnjimi modeli večjo fleksibilnost, ki je lahko pomembna, saj veliko padavinskih dogodkov ne prikaže idealnega, eksponentnega trenda v koncentraciji. Model je lahko uporabljen za bolj točno prilaganje večjega števila padavinskih dogodkov.

Slike 2, 3, 4 in 5 prikazujejo štiri primere odzivov modela za spreminjajoče se parametre. Povečanje β^* v splošnem pomeni povečanje »vrha« koncentracije oziroma maksimalno vrednost. Ko se β^* nagiba k 0, postane trend koncentracije linearen. Povečanje γ^* poveča končen preostanek koncentracije onesnažil. Povečanje α pa poveča delež in maso odtoka.

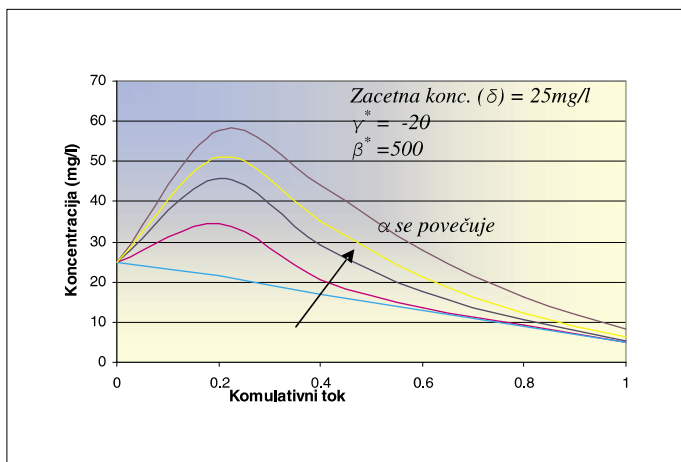
Model zagotavlja določitev koncentracije in je lahko uporaben namesto diskretnih točkovnih podatkov. Uporabimo ga lahko prav tako za napovedovanje kopičenja onesnažil in C_{EM} pred padavinskim dogodkom. Trajanje padavinskega dogodka se spreminja, kar otežuje napovedovanje koncentracij kot funkcije časa. Zato se model izogiba temu problemu z uporabo srednje izprane mase onesnažil.



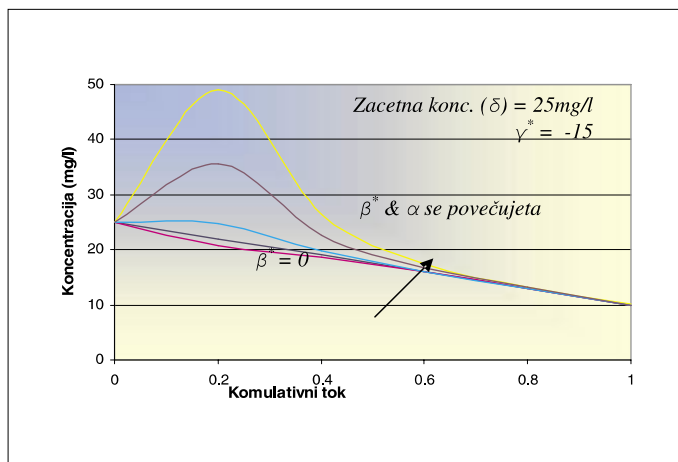
Slika 2 • Občutljivostna analiza parametrov modela za β^* ni konstanta



Slika 3 • Občutljivostna analiza parametrov modela za γ^* ni konstanta



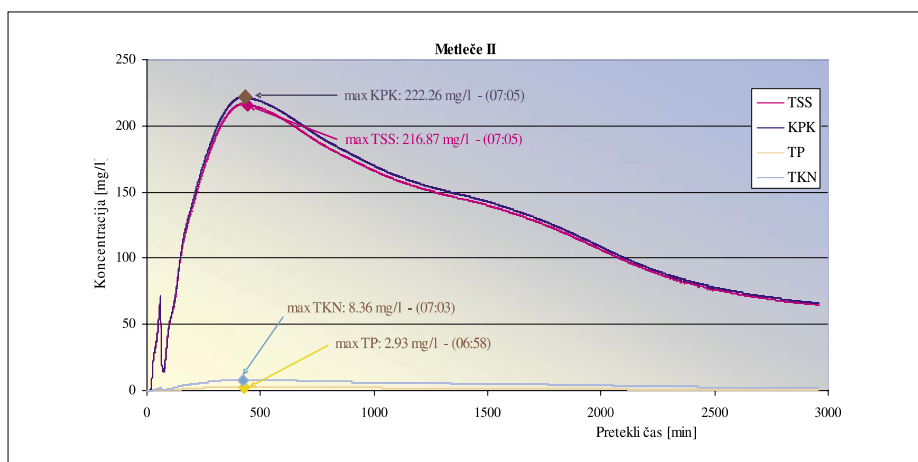
Slika 4 • Občutljivostna analiza parametrov modela za α ni konstanta



Slika 5 • Občutljivostna analiza parametrov modela za α in β^* nista konstantna

4 • REZULTATI SIMULACIJE

Simulacije prvega vala smo delali z dejanskimi podatki. Slika 6 prikazuje za konkretni primer na kanalizacijskem sistemu časovni potek koncentracij prvega vala za suspendirane snovi – TSS, kemijsko porabo kisika – KPK, celotni dušik – TKN, celotni fosfor – TP na razbremenilniku brez zadrževanja.



Slika 6 • Časovni potek koncentracij prvega vala za suspendirane snovi TSS, KPK, TKN in TP (Mlakar, 2007)

5 • SKLEP

Ovrednotili smo fenomen prvega vala onesnaženja, ki se nanaša na začetno stanje padavinskega dogodka, ki vsebuje, odstočkovno gledano, veliko količino onesnažil glede na volumen padavinskega odtočnega vala. Model SWMM uporablja razmerje masnih emisij kot vodilne enačbe in izraža koncentracije ali kopičenje onesnažil kot funkcijo časa. Spremenljivke so odvisne od volumna odтока, intenzitete padavin, intenzitete prometa, predhodnih sušnih dni, obdajajoče izbire tal in drugih parametrov.

Razlika med minimumom in maksimumom izprane mase ter srednjimi količinami (CEM) so velike zaradi karakteristik samega dogodka in vplivov lokacije vzorčenja, intenzitete padavin, velikosti območja, odtočnega koeficienta in predhodnega sušnega obdobja. CEM je torej v povezavi s trajanjem padavin, celotnim padavinskim dogodkom, celotnim odtočnim volumnom in povprečno intenzivnostjo padavin. Večji padavinski dogodki imajo manjši CEM zaradi učinkov razredčenja

ali izpranih mas onesnažil. Zmanjšanje koncentracije onesnažil je včasih nadomeščeno s povečanjem razmerja odтока v odvisnosti od napredovanja padavinskega dogodka. Prvi val onesnaženja oziroma čistilni val, ki nastane na začetku padavinskega odтока, je treba zadržati in ga po koncu padavinskega dogodka oziroma takrat ko se odtočne razmere v KS umirijo, odvesti na čistilno napravo, kjer se biološko očisti pred izpustom v odvodnik.

6 • LITERATURA

- Bertrand-Krajewski, J.-L., Ghassan, C., Saget, A., Distribution of Pollutant Mass vs. Volume in Stormwater Discharges and the First Flush Phenomenon. *Water Research*, Volume 32, Issue 8, August. Str. 2341–2356, 1998.
- Deletic, A., The first flush load of urban surface runoff, *Water Research*, 32(8), 2462–2470, Rank 1/57, *Water Resources Category*, 1998.
- Kim, Lee-Hyung., Kayhanian, Masoud., Zoh, Kyung-Duk., Stenstrom, Michael K., Modeling of highway stormwater runoff. *Science of the total Environment.*, 348, pp. 1–18, 2005.
- Maleiner, F., Razbremenjevanje padavinskih odtokov po nemških ATV-smernicah, *Gradbeni vestnik*, julij 2005.
- Mangani, G., Berloni, A., Bellucci, F., Tatano, F., Maione, M., Evaluation of the pollutant content in road runoff first flush waters, University of Urbino, Centro di Studio per la Chimica dell' Ambiente e le Technologie Strumentali Avanzate, 6, Piazza Rinascimento, Urbino, Italy. *Water, Air and Soil Pollution* pp. 213–228, 2005.
- Mrakar, J., Modeliranje zadrževanja in razbremenjevanja onesnaženosti padavinskih voda v kanalizacijskih sistemih, *Diplomska naloga*, UL, FGG, Vodarstvo in komunalni inženiring, 89 strani, 2007.
- Panjan, J., Prvi val onesnaženja, analiza delovanja in nastavitvev GIS obstoječih zadrževalnih bazenov pri avtocestah. *Razvojno-raziskovalna naloga*. Zaključno poročilo v letu 2001. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Gradbeništvo in geodezijo, str. 76, 2001.
- Rep, D., Uporaba programa SWMM in smernic ATV-A 128E za dimenzioniranje kanalizacijskih sistemov in zadrževalnih bazenov. *Diplomska naloga*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer, str. 106, 2007.
- Rossman, L. A., *Storm Water Management Model User`s Manual Version 5.0*. Cincinnati, OH, Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency: str. 239. Povzeto po: <http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/index.htm>, 2005.
- Rutar, A., Analiza vpliva parametrov po standardu ATV-A 128E, *Diplomska naloga*, UL, FGG, Oddelek za gradbeništvo, Komunalna smer, 86 strani, 2008.
- Sharifi, S., Massoudieh, A., Kayhanian, M., A Stochastic Stormwater Quality Volumen-Sizing Method with First Flush Emphasis, *Water Environment Research*, Volumen 83, Number 11, 2011.
- Stenstrom, M. K., Kayhanian, M., First Flush Phenomenon Characterization, Kalifornian Department of Transportation, Division of Environmental Analysis, Sacramento, str. 69, 2005.
- ATV-A 128E., *Standards for the Dimensioning and Design of Stormwater Overflows in Combined Wastewater Sewers*, str. 74, 1992.