

Procjena zagađenja od oborinskih voda u krškim područjima

Jure Margeta, Ivana Fistanić, Marija Šarić

Ključne riječi

oborinske vode,
godišnji teret zagađenja,
krš,
naseljena područja,
zaštita voda,
Kaštelanski zaljev

Key words

rainwater,
annual pollution load,
karst,
populated areas,
water protection,
Kaštela bay

Mots clés

eaux de précipitation,
charge polluante
annuelle,
karst,
régions peuplées,
protection des eaux,
baie des Kaštel

Ключевые слова

воды атмосферных
осадков,
годовая нагрузка
загрязнения, карст,
населённые районы,
защита вод,
Каителанский залив

Schlüsselworte:

Niederschlagsgewässer,
jährliche
Verschmutzungsbelastung,
Karst,
Siedlungsgebiete

J. Margeta, I. Fistanić, M. Šarić

Izvorni znanstveni rad

Procjena zagađenja od oborinskih voda u krškim područjima

U radu se analiziraju problemi proračuna srednje godišnje veličine tereta zagađenja oborinskih voda urbanih područja. Bez poznavanja tih podataka ne može se planirati i gospodariti kakvoćom voda i obalnim morem. Postoji više metoda koje se koriste za proračun, a tipične su prikazane u ovom radu. Međutim, za područje krša metoda proračuna godišnjeg tereta zagađenja nije razvijena, te je stoga predložena nova metoda značajke koje su prikazane na primjeru Kaštelanskog zaljeva.

J. Margeta, I. Fistanić, M. Šarić

Original scientific paper

Assessment of rainwater-generated pollution in karst regions

Problems of determining average annual values of pollution load generated by rainwater in urban areas are analyzed. The quality of water and coastal sea can not be planned and improved without a proper access to relevant information. Several methods are currently used in this calculation. Typical ones are presented in the paper. However, as the method for calculating an annual pollution load in karst areas has not as yet been developed, the authors present main features of a new method and use Kaštela bay to illustrate the method.

J. Margeta, I. Fistanić, M. Šarić

Ouvrage scientifique original

Evaluation de la pollution par les eaux de précipitation dans les régions karstiques

L'article analyse les problèmes du calcul de la charge polluante annuelle moyenne par les eaux de précipitation dans les zones urbaines. La planification et la gestion de la qualité des eaux et de la mer littorale ne sont pas possibles sans une connaissance approfondie de ces données. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées dans ce calcul, dont les plus typiques sont décrites dans l'article. Cependant, comme aucune méthode de calcul de la charge polluante annuelle n'a été développée pour le karst, on propose une nouvelle méthode dont les caractéristiques sont présentées à l'exemple de la baie des Kaštel.

Ю. Маргета, И. Фистанич, М. Шарич

Оригинальная научная работа

Оценка загрязнения в карстовых областях атмосферными водами

В работе анализируются проблемы расчёта среднегодовой нагрузки загрязнения атмосферных вод урбанистических территорий. Без знания тех данных невозможно планировать и управлять качеством вод и прибрежной частью моря. Существует большее число методов, применяемых для расчёта, а типичные показаны в этой работе. Между тем, для карстовой области метод расчёта годовой нагрузки загрязнения не развит, поэтому предложен новый метод, характеристики которого показаны на примере Каителанского залива.

J. Margeta, I. Fistanić, M. Šarić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Schätzung der Verschmutzung durch Niederschlagsgewässer in Karstgebieten

Im Artikel analysiert man die Probleme der Berechnung der mittleren Jahresverschmutzungsbelastung der Niederschlagsgewässer in städtischen Gebieten. Ohne diese Daten zu kennen kann man die Qualität der Gewässer und des Meeres in Nähe der Küste weder planen noch walten. Es gibt mehrere Methoden die für die Berechnung genutzt werden. Die typischen sind in diesem Artikel dargestellt, doch ist für das Karstgebiet noch keine Methode für die Berechnung der jährlichen Verschmutzungsbelastung entwickelt. Deshalb wird hier eine neue Methode vorgeschlagen deren Kennzeichen am Beispiel des Golfs von Kaštela dargestellt sind.

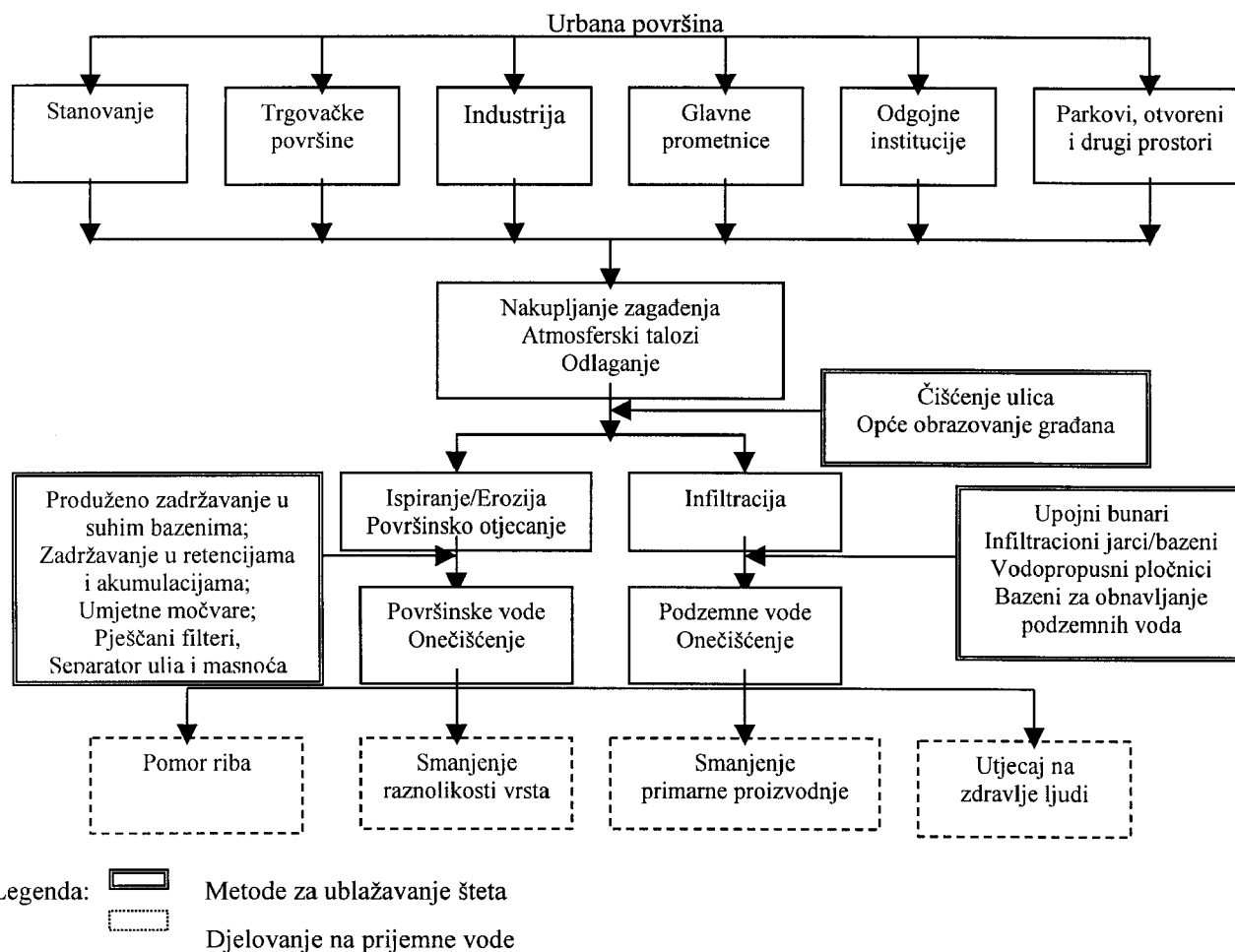
Autori: Prof. dr. sc. **Jure Margeta**, dipl. ing. građ.; **Ivana Fistanić**, dipl. ing. građ.; Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Matice hrvatske 15; **Marija Šarić**, dipl. ing. građ., Projektni ured "Glavinić", Metković

1 Osnovne značajke problema

Komunalne oborinske vode jedan su od značajnijih izvora nekontroliranog zagađenja vodnih resursa. Ukupne količine otpadnih tvari koje se ispiru oborinskom vodom ovise o nizu činitelja, a naročito: o veličini atmosferskog taloga; veličini onečišćenja koje se odlaže na slivne površine, o vremenu suhog razdoblja između dviju oborina (dulje razdoblje - veće onečišćenje); učestalosti čišćenja površine u suhom razdoblju (češće čišćenje manje zagađenje), o obujmu i intenzitetu oborinske vode kojom se obavlja ispiranje zemljišta, itd. Količine i koncentracija zagađenja u oborinskim su vodama promjenljivi. Najveće su koncentracije, ali i količine otpadnih tvari, u početku otjecanja (početna kiša), a s trajanjem otjecanja smanjuju se kao rezultat sve manjeg ispiranja taloga na slivnim površinama. Na režim ispiranja, odnosno transporta zagađenja, bitno utječu značajke slivne površine. Kad je propusnost tla manja ili su posrijedi površine poput prometnica, smanjena je mogućnost tokovi vode koji lakše i brže odnose otpadne tvari s površine tla. Na slici 1. slikovito je prikazan tok zagađenja s

urbanim slivnim površina do prijamnika, te utjecaj tog zagađenja na prijamne vode i njezine korisnike, a navedene su i neke važnije mjere kojima se smanjuje nagomilavanje zagađenja.

Oborinske vode osim što površinski otječu u prijamnike jednim se dijelom infiltriraju i u podzemlje. Procjeđivanjem vode kroz podzemlje dolazi do otapanja tvari u tlu u skladu sa sastavom tla (prirodnim ili onečišćenim) i dijelom transporta zagađenja s površine. Međutim, istodobno, prolazom kroz tlo, voda se filtrira i u njoj dolazi do biokemijskih procesa, tako da se dio zagađenja u podzemnim vodama pročišćava i mijenja. Kod tala malog poroziteta uglavnom sve suspendirane tvari biva ju zadržane, dok samo otopljene ostaju u vodi i zbog dugog zadržavanja u podzemlju mogu dijelom biti preuzete od biosfere i tako izdvojene iz vode. Manje i nepovezane pukotine koje malo pridonose protoku vode također pridonose zadržavanju i eventualno smanjenju zagađenja koje voda sadrži, a u slučaju njihove povezanosti predstavljaju značajne trajektorije za tok vode i prijenos zagađenja. Zone gdje su pukotine koncentrirane i pove-



Slika 1. Shema izvora zagađenja u urbanim oborinskim vodama, njihov utjecaj na prijamnike i upravljanje tim vodama [1]

zane su zone brze izmjene podzemne vode zajedno sa zagađenjem. Zbog toga krška područja u principu nemaju značajnijih utjecaja na promjenu kvalitete vode koja dotječe sa slivnih površina, odnosno efekti pročišćavanja su mali.

Proces stvaranja, ispiranja, transporta (površinski i podzemno) i samopročišćavanja zagađenja dosta je složen i u potpunosti nerazriješen što značajno otežava proračun srednjeg godišnjeg tereta zagađenja oborinskih voda. Međutim, poznavanje srednjega godišnjeg tereta zagađenja koje donose oborinske vode u vodne resurse vrlo je važno za planiranje i upravljanje kakvoćom vode. Bez obzira na veliku važnost, literatura koja se bavi problemom proračuna godišnjeg tereta zagađenja koje nose oborinske vode dosta je oskudna, naročito za krška područja. Polazeći od dobro poznate metode "koncentracija-vrijeme-protok" (2) koja je poznata i kao metoda "stalne koncentracije" (3), formulirana je nova metoda "Split" prikladna za primjenu u krškim područjima.

2 Tipične metode proračuna godišnjeg tereta zagađenja oborinskih voda

Postoji cijeli niz metoda za proračun tereta zagađenja koje oborinske vode donose u vodne resurse. U nastavku će biti izložene neke od poznatijih, odnosno tipične metode te metodu "Split" koja je primijenjena za područje Kaštelanskog zaljeva.

2.1 Grupa jednostavnih metoda

2.1.1 Metoda "koncentracija-vrijeme-protok"

Jedna od najviše primjenjivanih metoda jest metoda "koncentracija-vrijeme-protok" (2), poznata kao i metoda "stalne koncentracije" (3). Po ovoj metodi srednja godišnja koncentracija i srednji godišnji volumen otjecanja u kišnom i sušnom razdoblju množe se da bi se dobio teret zagađenja površinskih voda u kišnom i sušnom razdoblju. Tereti zagađenja iz ovih dvaju razdoblja se zbrajaju, a rezultat je ukupni godišnji teret zagađenja površinskih voda:

$$T_{GOD} = (C_{SR,K} \cdot V_K + C_{SR,S} \cdot V_S) \cdot K_{TR} \quad (1)$$

T_{GOD} - godišnji teret zagađivanja [kg]

V_K - volumen oborinskih voda u kišnom razdoblju godine [m³]

t_K - kišno razdoblje [s]

$C_{SR,K}$ - srednja godišnja koncentracija zagađenja u kišnom razdoblju [mg/l]

V_S - volumen oborinskih voda u sušnom razdoblju godine [m³]

t_S - sušno razdoblje [s]

$C_{SR,S}$ - srednja godišnja koncentracija zagađenja u sušnom razdoblju [mg/l]

K_{TR} - koeficijent transformacije jedinica.

Volumen otjecanja može se dobiti koristeći se konceptom volumenskog koeficijenta otjecanja K koji je definiran kao omjer količine otekle ($P_{eK/S}$) i pale oborine ($P_{K/S}$) u kišnom, odnosno sušnom razdoblju:

$$K_{K/S} = \frac{P_{eK/S}}{P_{K/S}} \quad (2)$$

Volumen vode koja otječe dobijemo množenjem koeficijenta otjecanja K sa srednjom visinom oborina u kišnom $P_{SR,K}$ [m] odnosno sušnom razdoblju godine $P_{SR,S}$ [m], i površinom sliva F (m²).

$$V_{K/S} = K_{K/S} \cdot P_{SR,K/S} \cdot F \quad (3)$$

2.1.2 Metoda The Storm Water Management Model (SWMM)

Teret zagađenja prema SWMM metodi [4] na godinu određuje se na sljedeći način:

$$T_{GOD} = a_{i,j} \cdot P \cdot f(\rho_{st}) \cdot F \quad (4)$$

$a_{i,j}$ - faktor zagađenja u funkciji tipa zagađivača i tipa zemljišta

P - godišnje oborine [m/god.]

F - površina sliva [m²]

ρ_{st} - gustoća stanovanja u urbanim uvjetima [br. stanovnika/m²]

$f(\rho_{st})$ - funkcija gustoće stanovanja.

Vrijednosti $f(\rho_{st})$ su različite za stambene, trgovačke, industrijske i druge urbane površine (škole, parkovi,..).

$$f(\rho_{st}) = 0,142 + (0,218)(\rho_{st})^{0,54} \text{ za stambena područja}$$

$$f(\rho_{st}) = I \text{ za trgovačka i industrijska područja}$$

$$f(\rho_{st}) = 0,142 \text{ za ostala područja}$$

Prema tomu, gustoća stanovanja traži se samo u slučaju stambenih područja. Gustoća stanovništva poklapa se s postotkom nepropusnosti slivnog područja I pa se može proračunati prema formuli (5):

$$I = 9,6 \rho_{st}^{[0,573 - 0,0391 \cdot \log_{10} d]} \quad (5)$$

$$I = \frac{F_{np}}{F} \cdot 100 \quad (6)$$

F_{np} - nepropusna površina [m²];

2.1.3 Jednostavna metoda (*The Simple Method*)

Godišnji teret zagađenja ovom metodom (6) određuje se na slijedeći način:

$$T_{GOD} = C \cdot P \cdot K \cdot f \cdot F \quad (7)$$

C - srednja koncentracija pokazatelja zagađenja [mg/l] na godinu

P - godišnja oborina [m]

K - koeficijent volumenskog otjecanja;

f - faktor korekcije što odgovara za oluje koje ne proizvode otjecanje. Za području Washingtona $f = 0.9$.

F - slivna površina [m²].

Koeficijent volumenskog otjecanja ovisi o cijelom nizu čimbenika od kojih je vodonepropusnost slivne površine (I) najznačajniji, a računa se formulom:

$$K = 0,05 + 0,9 \left[\frac{I}{100} \right] \quad (8)$$

gdje je I postotak vodonepropusnih površina u slivnom području.

2.2 Regresijski modeli

2.2.1 The United States Geological Survey Regression Model (USGS)

Godišnji teret zagađenja u regresionom modelu (7) se određuje na način da se odredi regresiona funkcija pojedinog pokazatelja zagađenja:

$$T_{GOD} = f_k \cdot N \cdot \left\{ 10^{(b_0 + b_1 \sqrt{F} + b_2(I) + b_3(P) + b_4(t) + b_5(x_2))} \right\} \quad (9)$$

f_k - faktor korekcije;

N - broj oluja u godini;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ - koeficijenti regresije za pojedine tvari/pokazatelje zagađenja

F - površina sliva [milje²]

I - postotak vodonepropusnih površina

P - srednje godišnje padaline [in]

t - minimalna temperatura u siječnju, uglavnom se rabi kao indikator veoma hladnog vremena ili snježnih uvjeta [°F]

x_2 - parametar jednak 1 ako s industrijske i trgovačke površine otječe više od 75% od ukupnog otjecanja s područja, inače je 0.

U USGS modelu regresije, oluje su definirane kao oborine koje proizvode najmanje 0,05 [inchi] od ukupnih oborina i koje su odvojene s barem 6 uzastopnih sati bez oborina. Metoda se primjenjuje za slivove veličine do

0,8 milja² (1,6 km²). Ova se metoda može upotrijebiti samo za prostore koji imaju iste značajke kao i oni prostori na temelju kojih je određena regresijska funkcija.

2.3 Simulacijska metoda (*The Continuous Simulation Method*)

Godišnji teret zagađenja ovom metodom (1) dobije se na slijedeći način:

$$T_{GOD} = C \cdot P \cdot K \cdot F \quad (10)$$

C - srednja koncentracija zagađenja [mg/l]

P - godišnja oborina [m]

K - koeficijent otjecanja

F - površina sliva [m²].

Ova metoda za razliku od prikazanih bitno preciznije proračunava veličinu otjecanja vode (koeficijent K), bazirajući se na svakodnevnim oborinama/protoci. Veličine otjecanja na dan računaju se primjenom SCS metode (*Soil Conservation Method*) (8), uz uporabu povijesnog niza podataka o dnevnim oborinama (bar 10 godina). Bitna razlika između ove i drugih metoda jest u tome što ova metoda kao vodonepropusnu površinu (onu koja generira površinsko otjecanje) uzima samo onu koja je direktno vezana uz sustav odvodnje. Osim toga ova metoda za račun treba specifičnu srednju koncentraciju određenog pokazatelja C_{SR} koja je srednja vrijednost triju specifičnih otjecanja. Ta otjecanja moraju zadovoljiti ove kriterije:

- (1) veličina kiše mora biti veća od 0,25 cm
- (2) prije kiše sušno razdoblje mora biti minimalno 72 sata
- (3) visina i trajanja oborina ne smiju biti 50% drugačiji od visine i trajanja srednjeg pljuska razmatranog područja.

Za primjenu ove metode treba imati dovoljno svakodnevnih podataka bar 10 godina.

Sve navedene metode primjenjivale su se u praksi na područjima za koja su razvijene. Kvaliteta dobivenih rezultata je u granicama kvalitete ulaznih podataka od kojih je srednja koncentracija pojedinog pokazatelja zagađenja na godinu najkritičniji podatak. Zbog toga se verifikacija metoda teško može provesti. Razlog zbog kojeg nema podataka o koncentraciji otpadnih tvari u oborinskim vodama i općenito o teretu zagađenja oborinskih voda vrlo je složeno i skupo mjerenje koje mora biti trajno, najmanje jednu godinu. Proračun se inače lako obavlja primjenom Excela u relativno kratkom vremenu.

3 Metoda "Split"

3.1 Osnovne značajke

U prikazu nekih od raspoloživih metoda vidljivo je da se sve metode u principu koriste istom osnovnom formulom, s tim da svaka metoda na drugačiji način pokušava odrediti članove formule. Međutim, vidi se da se sve formule za procjenu tereta zagađenja koje ulazi u prijamnik koriste isključivo površinskim otjecanjem, a zanemaruje se podzemno. Takav je pristup razumljiv ako je volumen površinskog otjecanja u prijamnik bitno veći od podzemnog, a što je slučaj kod gusto izgrađenih područja. Takva je situacija također i u područjima gdje je podzemno otjecanje vrlo sporo, kao što su glinovita ili glinovito-pjeskovita tla. Međutim, takva situacija nije u području gdje je ukupno podzemno otjecanje na godinu podjednako ili značajnije od površinskog, što je slučaj u krškim slabo izgrađenim područjima. To posebno vrijedi za područja u kršu gdje je opremljenost urbanih sredina vrlo slaba, odnosno gdje je zastupljenost izgrađenih vodonepropusnih površina vrlo mala. U ovim je situacijama moguće, a i potrebno, uzeti u obzir i podzemno otjecanje ne samo zato što je količina vode značajna, već i stoga što se tečenjem kroz krš sastav/kakvoća oborinskih voda značajno ne mijenja (9). Tečenjem vode u krškom podzemlju ne dolazi do značajnije filtracije vode, a ni drugih procesa, zbog kratkog zadržavanja vode u podzemlju /10/. Zbog toga podzemna voda ima sve značajke površinske vode koja teče potpovršinski. U skladu s ovim, predložena je nova metoda "Split".

U svom najjednostavnijem obliku metoda izostavlja različita vremenska razdoblja (sušno, kišno) te se koriste srednjim vrijednostima za cjelogodišnje razdoblje, a također izostavlja različite uvjete otjecanja u slivu jer se sliv uzima cjelovito kao jedna površina prosječnih značajki (koeficijent otjecanja i slično).

U ovom slučaju ukupni teret zagađenja koje se stvara samo površinskim otjecanjem jest:

$$T_{GOD,POV} = C_{GOD} \cdot Q_{SR,GOD} \cdot 365 \cdot K_{TR} \quad (11)$$

$T_{GOD,POV}$ - godišnji teret zagađenja od površinskog otjecanja [kg]

C_{GOD} - srednja godišnja koncentracija zagađenja [mg/l]

$Q_{SR,GOD}$ - srednji godišnji protok površinskih oborinskih voda [l/s]

$$K_{TR} = 86,400 [s].$$

Izraz (11) možemo napisati u obliku:

$$T_{GOD,POV} = C_{GOD} \cdot V_{POV} = C_{GOD} \cdot P \cdot K_{LOS} \cdot \psi \cdot A \quad (12)$$

V_{POV} - ukupni godišnji volumen oborinskih voda koje otječu površinski [m³]

P - ukupna godišnja oborina [m]

A - površina slivnog područja [m²];

ψ - volumenski godišnji koeficijent preraspodjele površinskih voda i voda koje infiltriraju u podzemlje, $\psi \leq 1$

K_{LOS} - godišnji koeficijent površinskih gubitaka oborina, $K_{LOS} \leq 1$.

Kad u prijamnik dotječu i podzemne vode koje su opterećene zagađenjem, ukupnim oborinskim vodama potrebno je pridodati i njih. Volumen vode koji otječe u tlo jest:

$$V_{INF} = P \cdot K_{LOS} \cdot A(1 - \psi) \quad (13)$$

a teret je zagađenja koje nose ove vode:

$$T_{GOD,INF} = V_{INF} \cdot C_{GOD} \quad (14)$$

Kako se dio ovih voda gubi evapotranspiracijom putem bilja, stvarna količina tereta zagađenja i vode koja ostaje u tlu je manja, tako da je volumen vode koji teče u podzemlje:

$$V_{POD} = V_{INF} \cdot K_{ET} \quad (15)$$

K_{ET} - godišnji koeficijent gubitaka zbog evapotranspiracije i zadržavanja vlage u tlu, $K_{ET} \leq 1$.

Umjesto jednog koeficijenta kojim se određuje potpuna preraspodjela bruto oborina na one koje otječu površinski i one koji ulaze u podzemne vode, predložena su tri koeficijenta kako bi se sve etape transformacije oborina u volumen vode preciznije opisale. To je povoljno naročito ako će se teret zagađenja računati za kraća vremenska razdoblja od godine dana (sezonski) i u situacijama kad je dio površina izgrađen, a dio neizgrađeni krški teren. Ako se proračun radi za jednu prosječnu godinu, tada se koeficijent površinskih gubitaka K_{LOS} i u objediniti u ukupni koeficijent gubitaka oborina K_{ukup} kojim se množi bruto oborina kako bi se dobila neto oborina. Međutim, ako se želi odrediti količina zagađenja i vode koja je izdvojena evapotranspiracijom/biljem tada se valja koristiti s više koeficijenata (slika 3.).

Budući da se dio zagađenja zadržava u tlu zbog procesa filtracije i drugih biokemijskih procesa, dio zagađenja koji se nalazi u podzemnim vodama se smanjuje, tako da ga možemo proračunati kao:

$$T_{GOD,POD} = V_{POD} \cdot C_{GOD} \cdot K_{P,PRO} \quad (16)$$

$K_{P,PRO}$ - godišnji koeficijent samopročišćavanja podzemnih voda, $K_{P,PRO} \leq 1$.

U skladu s navedenim, ako površinske oborinske vode i podzemne vode dotječu u isti prijamnik, ukupni godišnji teret zagađenja s razmatranog slivnog područja bit će:

$$T_{GOD} = T_{GOD,POV} + T_{GOD,POD} \quad (17)$$

odnosno:

$$\begin{aligned} T_{GOD} &= P \cdot K_{LOS} \cdot A \cdot \psi \cdot C_{GOD} \\ &+ P \cdot K_{LOS} \cdot A \cdot (1 - \psi) \cdot K_{ET} \cdot K_{P,PRO} \cdot C_{GOD} \\ &= P \cdot K_{LOS} \cdot A \cdot C_{GOD} [\psi + (1 - \psi) \cdot K_{ET} \cdot K_{P,PRO}] \end{aligned} \quad (18)$$

Ako se godišnja količina tereta zagađenja oborinskih voda želi preciznije odrediti tada se posebno razmatraju kišno i sušno razdoblje. Ova podjela je posebno značajna u područjima koja inače imaju bitno različita dva godišnja razdoblja, kao što je to u slučaju mediteranske klime u Dalmaciji, jer se kvalitetnije mogu odrediti ulazni podaci, a posebno koeficijent pročišćavanja. Naime, veličina zagađenja koje istječe podzemnim vodama u kršu direktno je u funkciji protoka odnosno volumena vode u podzemlju (9). Zbog toga je u sušnom razdoblju kada su male količine vode u podzemlju, vrijeme zadržavanja vode znatno dulje pa time dolazi do zadržavanja zagađenja u podzemlju, a to rezultira bitno većim efektima pročišćavanja. U kišnom je razdoblju podzemljem brzi protok vode i njime pronos zagađenja s površine kao i onog akumuliranog u podzemlju tijekom sušnog perioda. Naime, u krškim područjima su površinski slojevi terena uglavnom raspucani i kroz taj se sloj zemljišta događa tipično turbulentno kretanje vode takozvanim prioritetnim putovima slično cijevnom sustavu (11). U dubljim je slojevima, gdje su dominantne fine pukotine, koje su dijelom i zapunjene nanosom, takozvano difuzno tečenje. Cijeli se sustav aktivira u kišnom razdoblju kada se ostvaruje brzi kontakt između sliva i prijarnika, a tada je koeficijent pročišćavanja bino manji. U sušnom razdoblju odvija se mirno difuzno tečenje te su efekti pročišćavanja bitno veći, a time i koeficijent pročišćavanja. U takvim situacijama jednadžba (17) proširuje se tako da obuhvaća dva različita razdoblja:

$$T_{GOD} = (T_{POV,SUŠNO} + T_{POD,SUŠNO}) + (T_{POV,KIŠNO} + T_{POD,KIŠNO}) \quad (19)$$

tako da u proširenom obliku glasi:

$$\begin{aligned} T_{GOD} &= P_{sušno} \cdot K_{los,sušno} \cdot A \cdot C_{sušno} \\ &\times [\psi_{sušno} + (1 - \psi_{sušno}) \cdot K_{ET,sušno} \cdot K_{P,PRO,sušno}] \\ &+ P_{kišno} \cdot K_{los,kišno} \cdot A \cdot C_{kišno} \\ &\times [\psi_{kišno} + (1 - \psi_{kišno}) \cdot K_{ET,kišno} \cdot K_{P,PRO,kišno}] \end{aligned} \quad (20)$$

$$t_{sušno} + t_{kišno} = 365$$

Preciznost proračuna zatim se može poboljšati ako se proračun razdvaja za različite površine. U krškim pod-

ručjima su bitne razlike u otjecanju preko izgrađenih i neizgrađenih površina, jer se kod neizgrađenih površina pretežiti dio oborinskih voda infiltrira u podzemlje (40 - 65%, (11)), a kod izgrađenih površina pretežiti dio oborinskih voda otječe površinski (40 - 80%, (12)). Zbog toga se preciznost proračuna može poboljšati ako se ove dvije površine u proračunu uzimaju odvojeno, odnosno ako se bilanca zagađenja radi za dvije osnovne vrste površina u slivnom području koristeći se prikazanim postupcima (20):

$$T_{GOD} = T_{GOD}^{IZGRAD} + T_{GOD}^{NEIZGRAD} \quad (21)$$

Ovo posebno ima smisla u područjima s rijetkom izgradnjom jer je neizgrađeno područje mnogo veće od izgrađenog. Neizgrađena površina značajan je izvor zagađenja zbog taloga iz atmosfere i susjednih izgrađenih područja, otpada i poljoprivrednih aktivnosti na okućnicama. Prema tome, ova zagađenja treba uzeti u proračun godišnje bilance zagađenja slivnog područja. Slična je situacija i na neizgrađenim površinama u gušće izgrađenim sredinama s tim da je veličina ovih površina manja. Po potrebi može se ići i u detaljniju podjelu prostora uzimajući u obzir i značajke sustava odvodnje površinskih voda, recimo: na neizgrađeni, izgrađeni prostor bez sustava odvodnje i izgrađeni prostor sa sustavom odvodnje.

Preciznost proračuna se potom može poboljšati uzimajući u obzir značajke sustava odvodnje površinskih voda. Zbog velike infiltracije u kršu površinske vode s izgrađenih područja postaju podzemne ako sustava (kanalizacije) nema ili je loše izveden. Ovaj problem se rješava uvođenjem koeficijenta učinkovitosti sustava odvodnje površinskih voda ($KK < 1$). Ovaj koeficijent raspodjeljuje površinske vode, uglavnom izgrađenih područja, na one koje otječu sustavom odvodnje (kanalizacijom) u prijamnik ($V_{POV} \times KK$) i na one koje se iz sustava odvodnje gube u podzemne vode ($V_{POV} \times (1 - KK)$). Prema tomu, veličina koeficijenta (KK) ovisi o značajkama sustava odvodnje, pa tako pretpostavljamo da su njegove vrijednosti:

- ako nema sustava odvodnje; $0,0 \leq KK \leq 0,1$
- ako je sustav djelomičan; $0,2 \leq KK \leq 0,6$
- ako je sustav potpun; $0,80 \leq KK \leq 0,95$

Uvodeći ovaj koeficijent i podjelu sliva na izgrađeni i neizgrađeni prostor, osnovna se formula (20) proširuje i glasi:

$$\begin{aligned} T_{GOD}^{IZGRAD} &= P \cdot K_{LOS} \cdot A \cdot \psi \cdot C_{GOD} \cdot KK \\ &+ P \cdot K_{LOS} \cdot A \cdot \psi \cdot C_{GOD} \cdot (1 - KK) \cdot K_{ET} \cdot K_{P,PRO} \\ &+ P \cdot K_{LOS} \cdot A \cdot (1 - \psi) \cdot K_{ET} \cdot K_{P,PRO} \cdot C_{GOD} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} T_{GOD}^{NEIZGRAD} &= P \cdot K_{LOS} \cdot A \cdot \psi \cdot C_{GOD} \\ &+ P \cdot K_{LOS} \cdot A \cdot (1 - \psi) \cdot K_{ET} \cdot K_{P,PRO} \cdot C_{GOD} \end{aligned}$$

odnosno:

$$T_{GOD} = T_{GOD}^{IZGRAD} + T_{GOD}^{NEIZGRAD} \quad (23)$$

U urbanim površinama poduzimaju se mjere kojima se zagađenje akumulirano na površinama čisti. Zbog toga je poznavanje učinkovitosti čišćenja urbanih površina važno za pravilni proračun godišnjih količina. Učinak čišćenja se u proračun unosi odgovarajućim koeficijentom učinkovitosti čišćenja u odnosu prema razmatranom pokazatelju zagađenja. Isto se može primjene ovog čimbenika teret zagađenja na godinu jednak je:

$$T_{GOD} = T_{GOD} \times s \quad (24)$$

Čimbenik s ovisi o intervalima čišćenja Ns , a prema (4), ako je $Ns > 20$ dana, tada je $s = 1,0$, odnosno ako je $Ns < 20$ dana tada je $s = Ns/20$. Ovaj čimbenik primjenjuje se samo za izgrađena područja.

Povećanjem preciznosti/obuhvata proračuna potreban broj podataka se proširuje, ali se omogućuje njihov bolji izbor. Od svih ulaznih podataka najproblematičniji je podatak o prosječnoj koncentraciji, onda je uporaba podataka iz literature jedino rješenje. Ostale ulazne veličine moguće je lakše i preciznije proračunati, prije svega veličinu slivnog područja, prosječnu oborinu, te koeficijente vezane uz otjecanja. Proračun se može kvalitetnije napraviti ako postoje dobri podaci za pojedine jedinične čimbenike prostora i otjecanja. Tada se veličina pojedinih koeficijenata može dobiti superpozicijom jediničnih veličina, recimo: koeficijent otjecanja superpozicijom koeficijenata za jedinične značajke prostora (pad terena, geologija, obraslost terena, izgrađenost, orijentacija, visinska razlika, itd.). Očito je da je proračun prosječnoga godišnjeg opterećenja oborinskih voda u krškim urbanim područjima i u svom najjednostavnijem obliku složen i nezahvalan zadatak koji treba obaviti u skladu s mogućnostima.

4 Primjer

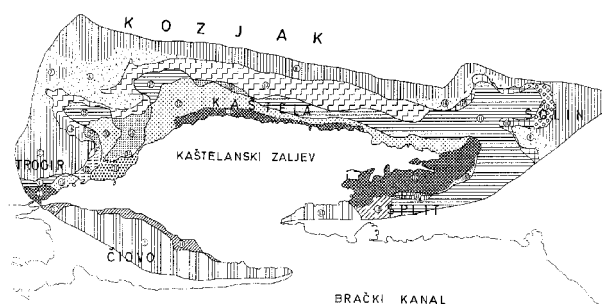
Metoda je primijenjena za proračun godišnjeg tereta zagađenja koje oborinskim vodama dotječe u Kaštelanski zaljev. U primjeru je razmatrano slivno područje Kaštelanskog zaljeva koje obuhvaća: sjeverni dio grada Splita, Solin i njegovo zaleđe (Klis, Mravinci, Kućine), Kaštela sa zaleđem do prirodne vododijelnice Kozjaka, Trogir te sjeverni dio otoka Čiovo (131,7 km²). Dio područja je krško područje, i to: uski sjeverni pojas Kozjaka, područje zaleđa Trogira, područje Kućina i Kose te Marjan. Svo ostalo područje je flišno. Pad terena je raznolik. Rubni dijelovi slivnog područja su vrlo strmi, prijelazni dio do obalnog pojasa je srednjeg pada, dok je obalni pojas vrlo blagog pada. Najveći dio ovog područja je naseljen, osim strmog područja uz sjevernu granicu sliva. Kanalizacijska mreža postoji u užim gradskim središtima: Splita, Solina, u dijelu Kaštela uz oba-

lu, Trogiru, dok Čiovo, dio Kaštela te čitavo istočno područje nema izgrađenu kanalizaciju.

U proračunu su uporabljeni sljedeći ulazni podaci: veličina površine, koeficijenti površinskog gubitka oborina, preraspodjele otjecanja i evapotranspiracije, koeficijent podzemnog pročišćavanja, oborine na godinu te koncentracije otpadnih tvari. Definiranje veličina površina, te procjena koeficijenata, i koncentracija otpadnih tvari izvršeni su s obzirom na sljedeće karakteristike: geologiju, pad terena, naseljenost te izgrađenost kanalizacijskog sustava. S obzirom na ove karakteristike, cijelo je područje podijeljeno na sljedeći način:

- geologija: krš i fliš
- pad: veliki, srednji i mali
- naseljenost: naseljeno i nenaseljeno
- kanalizacija: izgrađena i neizgrađena.

Preklapanjem površina ovih karakteristika dobivene su površine s pripadnim karakteristikama s obzirom na ova četiri osnovna svojstva. U skladu s tim područje je podijeljeno na 34 površine.



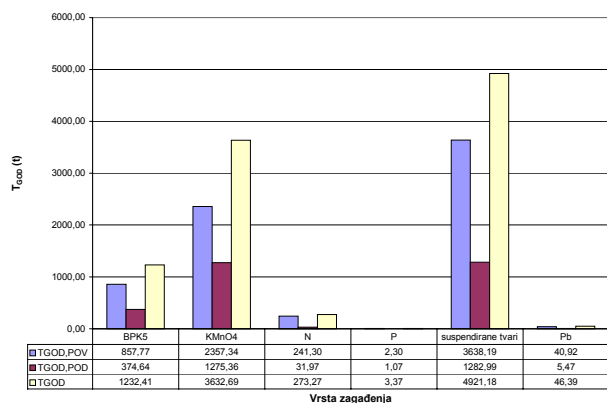
Slika 2. Podjela slivnog područja

Ulazni podaci (tablica 1.) dobiveni su procjenom s obzirom na stanje na terenu i literaturnim podacima (12). Veličina površina izračunana je iz karata. Za podatke o oborinama iskorišteni su podaci najbližih kišomjernih postaja, Split - Aerodrom i Split - Marjan. Koncentracije otpadnih tvari za pojedine površine pretpostavljene su u skladu sa podacima iz literature (13), (14). Pretpostavljene su koncentracije za sljedeće otpadne tvari: BPK₅, KMnO₄, dušik, fosfor, suspendirane tvari, olovo. Rezultati proračuna prikazani su tablično, i to za godišnji teret zagađenja površinskih i ispotpovršinskih voda, odnosno ukupni prosječni godišnji teret zagađenja (slika 3.).

Primjer zorno pokazuje sve teškoće proračuna prosječnoga godišnjeg tereta zagađenja koje oborinske vode unose u prijamnik. Očito je da se radi o gruboj procjeni količina. Bez razlike na to, veličine tereta zagađenja oborinskih voda treba izračunavati u skladu s raspoloživim podacima jer bez njih se ne može uspješno rješavati problem zaštite Kaštelanskog zaljeva.

Tablica 1. Ulazni podaci

Razmatrana područja	Površina A(m ²) 1	Koeeficijenti otjecanja		Koeeficijent pročišćavanja K _{P,PRO}	Godišnja oborina P* _{K_{LOS}} (m) 5	C (mg/l)-Konzentracija otpadne tvari					
		ψ 2	K _{ET} 3			Biološka potrošnja kisika BPK ₅ 10	Kemijska potrošnja kisika KMnO ₄ 11	Dušik N 12	Fosfor P 13	Suspendirane tvari ST 14	Olovo Pb 15
						4	6	7	8	9	10
1	1,16E+07	0,05	0,90	0,10	0,826	6	27	0,04	0,02	20	0,01
2	3,60E+05	0,65	0,85	0,10	0,826	15	35	0,20	0,03	80	0,03
3	7,10E+05	0,9	0,85	0,65	1,068	20	55	11,00	0,06	90	1,50
4	5,40E+05	0,65	0,85	0,65	1,068	19	53	8,00	0,05	85	1,00
5	7,89E+06	0,1	0,95	0,10	1,068	7	25	0,02	0,02	20	0,01
6	8,00E+06	0,6	0,62	0,65	1,068	7	25	0,02	0,02	20	0,01
7	9,40E+05	0,1	0,95	0,10	1,068	7	25	0,02	0,02	20	0,01
8	2,12E+07	0,1	0,95	0,10	1,111	7	25	0,02	0,02	20	0,01
9	1,42E+06	0,6	0,62	0,65	1,047	8	25	0,02	0,02	20	0,01
10	9,60E+05	0,65	0,85	0,65	1,047	11	35	1	0,04	30	0,02
11	2,20E+07	0,65	0,85	0,65	1,068	18	45	4	0,04	85	1
12	1,24E+06	0,01	0,55	0,65	0,785	22	60	11	0,07	90	1,5
13	1,93E+06	0,05	0,90	0,10	0,826	8	27	0,06	0,02	20	0,01
14	1,63E+06	0,65	0,85	0,10	0,826	14	34	2	0,03	28	0,03
15	5,60E+05	0,65	0,85	0,65	1,068	19	53	8	0,05	85	1
16	7,20E+05	0,05	0,90	0,10	1,068	7	27	0,04	0,02	20	0,01
17	1,49E+07	0,4	0,60	0,65	1,121	7	27	0,05	0,02	25	0,01
18	1,78E+06	0,6	0,62	0,65	1,111	7	25	0,02	0,02	25	0,01
19	1,46E+06	0,65	0,85	0,1	1,047	11	35	1	0,03	30	0,01
20	3,90E+05	0,65	0,85	0,65	1,004	22	60	11	0,07	90	1,5
21	4,60E+05	0,9	0,85	0,65	1,004	22	60	11	0,07	90	1,5
22	7,07E+06	0,9	0,85	0,65	0,785	21	55	10	0,07	90	2
23	7,10E+05	0,02	0,8	0,1	1,068	9	30	0,06	0,03	35	0,05
24	3,60E+05	0,35	0,55	0,65	1,068	9	30	0,05	0,03	35	0,05
25	1,41E+06	0,65	0,85	0,65	1,068	13	35	3	0,04	65	0,07
26	2,39E+06	0,35	0,55	0,65	1,068	9	33	0,9	0,03	65	0,05
27	1,78E+06	0,65	0,85	0,65	1,068	13	35	3	0,04	65	0,07
28	4,70E+05	0,35	0,55	0,65	1,153	9	27	0,8	0,04	60	0,04
29	1,08E+06	0,65	0,85	0,65	1,111	12	35	2	0,03	35	0,02
30	1,47E+06	0,65	0,85	0,65	1,068	13	35	3	0,05	80	0,08
31	1,39E+06	0,65	0,85	0,1	1,068	13	35	1	0,05	85	0,09
32	1,02E+07	0,65	0,85	0,65	1,132	20	50	9	0,05	80	1,3
33	2,32E+06	0,9	0,85	0,65	1,153	21	55	10	0,06	85	1
34	1,90E+05	0,02	0,8	0,1	1,068	9	33	1	0,05	40	0,03



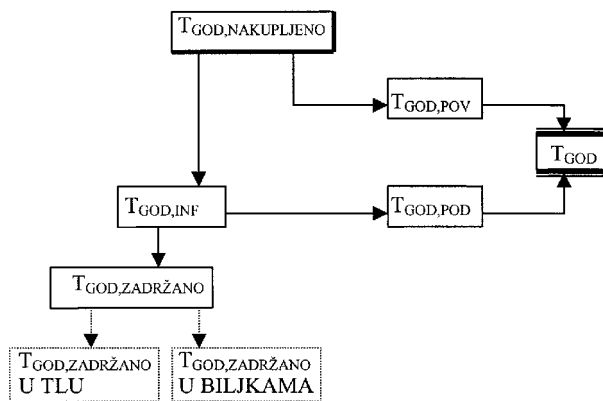
Slika 3. Grafikon s rezultatima proračuna

5 Rasprava i zaključci

Kad se govori o oborinskim vodama, važno je raščistiti o kojim se vodama radi: površinskim, podzemnim ili jednim i drugima. Kada se govori o površinskim oborinskim vodama tada se misli na vode koje površinski ili kanalizacijom dotječu u površinske vode, slatke i slane. Kada se govori o podzemnim oborinskim vodama tada se misli na dio oborinskih voda koje teku potpovršinski u pravcu podzemnog prijamnika, a u konačnosti površinskog. Znači, svaki dio oborinskih voda ima svoj zasebni prijamnik u koji dotječe i s kojim se miješa. Prema tomu oborinske vode nekog sliva uvijek su podijeljene u površinski i podzemni dio. Kod krša ova je podjela značajna, a podzemne vode zbog svoga kratkotrajnog zadr-

žavanja imaju značajke površinskih oborinskih voda. Za razliku od drugih, metoda "Split" se može rabiti za proračun tereta zagađenja površinskih oborinskih voda i podzemnih oborinskih voda zajedno ili odvojeno, te zagađenje koje se zadržava u tlu i raslinju, a sve u skladu s ciljevima i karakteristikama sliva i prijammnika (slika 4). Potom, važno je razlikovati stvaranje zagađenja na slivnoj površini od lokalnog pronosa zagađenja do unosa zagađenja u neki prijammnik. Kada se govori o količini zagađenja koje se stvara na određenom području, misli se na zagađenje koje nastaje na slivnom prostoru zbog prirodnih procesa i djelovanjem čovjeka.

Kada se govori o lokalnom pronosu stvorenog/preostalog zagađenja, tada se govori o količini koja otječe lokalno površinski slivnim područjem, kanalizacijom ako je ima, te lokalno potpovršinski. Transportom vode kroz slivno područje dolazi do promjena količine zagađenja koje se nalazi u oborinskim vodama, i to do smanjenja zbog taloženja i biokemijskih procesa, te do povećanja zbog erozije. U svakom konkretnom slučaju ovaj problem treba analizirati i na odgovarajući način uključiti u proračun. To se uglavnom postiže odgovarajućim izborom srednje vrijednosti koncentracije razmatranog pokazatelja zagađenja.



Slika 4. Komponente tereta zagađenja u urbanom hidrološkom ciklusu

Kada se govori o unosu zagađenja u vodne resurse, tada se misli na unos/dotok zagađenja oborinskim vodama, odvojeno u površinske vode i u vodonosnike. U specifičnim situacijama ukupni površinski i potpovršinski dotok oborinskih voda može biti u vodonosnik, ili površinski prijammnik, ili obalno more. Metoda "Split" namijenjena je upravo proračunu ukupnih godišnjih količina koje dotječu u određeni površinski i/ili podzemni prijammnik odnosno more.

Proces stvaranja, pronosa i ispuštanja zagađenja koje oborinske vode nose sa slivnog područja je dinamičan i može biti bitno drugačijih značajki u određenim hidrometeorološkim, hidrogeološkim, hidrološkim, ekološkim i prostornim uvjetima. Stoga je vrlo teško imati cjelovitu i sveobuhvatnu metodu za proračun tereta zagađenja oborinskih voda. To znači da metode kao što je i metoda "Split" trebaju dati osnovnu metodologiju koja se prilagođava, od slučaja do slučaja, značajkama problema koji se rješava. U slučaju da se raspolaze s kvalitetnim dnevnim ili mjesečnim podacima, metoda se može jednostavno proširiti tako da postaje simulacijska metoda.

Za naseljena područja u kršu se predlaže posebno analizirati teret zagađenja s izgrađenih i neizgrađenih površina, te za sušno i kišno razdoblje uzimajući u obzir i stanje oborinske kanalizacije. Proračun je u tom slučaju opsežniji, ali ne osobito složeniji. Međutim, procjena veličine koeficijenata je lakša i bolja, a time su rezultati proračuna pouzdaniji.

Predložena metoda "Split" jednostavna je za uporabu, a cijeli proračun može se obaviti primjenom Excela. Vrlo je prilagodljiva lokalnoj situaciji i potrebama jer je općenita/sveobuhvatna, tako da se može rabiti za krška i druga područja te za izgrađena i neizgrađena područja.

Da bi se u Hrvatskoj proračun prosječnoga godišnjeg tereta zagađenja oborinskih voda kvalitetno mogao proračunavati, bilo bi potrebno organizirati istraživanje kojim bi se utvrdile regionalne veličine koeficijenata koje se primjenjuju u metodi "Split". Na ovaj bi se način napravio značajan korak u zaštiti vode i obalnog mora.

LITERATURA

- [1] Pandit, A.; Gopalakrishnan, G.: *Estimation of Annual Pollutant Loads under Wet-Weather Conditions*, Journal of hydrologic engineering, Vol. 2, No. 4, October, 211-218, (1997).
- [2] Walsh, S.G.: *Urban surface water management*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1989.
- [3] ASCE: *Design and construction of urban storm water management system*, ASCE PRESS, New York, 1992.
- [4] Heany, J. P.; Huber, W. C.; Nix, S. J.: *Storm water management model: level I-preliminary screening procedures*, EPA Rep. no. 66/2-76-275, U.S. Envir. Protection Agency, Washington, D.C., 1976.
- [5] Stankovski, S. J.: *Magnitude and frequency of floods in New Jersey with effects of urbanisation*, Spec. Rep. 38, U.S. Geol. Survey, Water Resour. Div., Trenton, N.J., (1974)
- [6] Schueler, T. R.: *Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs*. Publ. no. 8703, Dept. of Envir. Programs Metropolitan Washington Council of Governments, 1987.
- [7] Driver, N. E.; Tasker, G. D.: *Techniques for estimation of storm-runoff loads, volumes, and selected constituent concentrations in urban watersheds in the United States*, U.S. Geol. Water Survey

- Water-Supply Paper 2363, U.S. Geol. Water Survey Water-Supply Paper 2363, U.S. Geol. Survey, 1990.
- [8] Soil Conservation Service: *Urban hydrology for the small watershed*, Technical Release 55, Washington D.C., US Department of Agriculture, 1986.
- [9] Margeta. J.; Fistanić I.: *Monitoring and water quality control of the Jadro karst spring*, Conference on Monitoring and Modeling Catchment Water Quality and Quantity, Ghent, Belgijum, 27-29-09.2000, Proceedings, 133-134., (2000).
- [10] Bonacci, O.: *Karst Hydrology*, Springer-Verlag, Berlin, 1987.
- [11] Bonacci, O.: *Monthly and annual effective infiltration coefficients in Dinaric karst: example of the Gradole karst spring catchment.*, Hydrological Science, 46 (2) , April, 287-299, (2001).
- [12] Margeta, J.: *Kanalizacija naselja*, Građevinski fakultet u Splitu, 1998.
- [13] Ellis, J.B.: *Pollutional aspects of urban Runoff*, NATO ASI Series, Vol. G10, Springer-Verlag, Berlin, 1 - 43, (1986).
- [14] Fong L.M.; Nazarudeen H.: *Collection of urban stormwater for potable water supply in Singapore*, Water Quality International, May/June, 36-40, (1996).