

PRONOS SUSPENDIRANE TVARI IZ SUSTAVA JAVNE ODVODNJE DO 10 000 ES S MEHANIČKIM PREDTRETMANOM I II. STUPNJEM PROČIŠĆAVANJA

prof. dr. sc. Goran Lončar, dipl. ing. građ.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Kačićeva 26, 10000 Zagreb
gloncar@grad.hr

doc. dr. sc. Dražen Vouk, dipl. ing. građ.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Vesna Grizelj Šimić, dipl. ing. građ.
Hrvatske vode
Ulica grada Vukovara 220, 10000 Zagreb

doc. dr. sc. Nenad Leder
Hrvatski hidrografski institut
Zrinsko-Frankopanska 161, 21000 Split

Silvija Klapčić, mag. ing. aedif.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Ivan Mišura, mag. ing. aedif.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Filip Štos, mag. ing. aedif.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

U radu je prezentiran metodološki pristup analize pronosa i taloženja na morsko dno suspendirane tvari iz sustava javne odvodnje veličine do 10000 ES s primarnim osvrtom na usporedbu primjene različitih tehničko-tehnoloških rješenja na uređajima za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV-ima). Rezultati predložene metodologije temeljene na numeričkom modeliranju pronosa suspendirane tvari u moru pokazat će razlike u opterećenju morskog dna talogom sitnozrnih čestica uslijed primjene različitog stupnja pročišćavanja na temelju čega će se omogućiti postavljanje metodološkog standarda za argumentaciju stava da mehanički predtretman u pojedinim situacijama predstavlja odgovarajući stupanj pročišćavanja ili njegovo opovrgavanje.

Predložena metodologija primijenjena je i na konkretnim primjerima za aglomeracije Banjole, Premantura, Primošten, Dugi Rat, Bol, Gradac i Orebić (manje od 10 000 ES). Prvom varijantom analizirana je primjena samo mehaničkog predtretmana, a drugom primjena drugog stupnja pročišćavanja na pripadnim UPOV-ima.

Rezultati provedenog istraživanja pokazuju da se u predmetnim akvatorijima prosječno 60 % od ukupno unešene suspendirane tvari taloži na dnu, u slučaju primjene mehaničkog predtretmana na UPOV-ima, te 40 % u slučaju primjene drugog stupnja pročišćavanja (uz 90 % redukcije suspendirane tvari na UPOV-ima). Procijenjeno je da maksimalno opterećenje dna u okolini difuzora podmorskog ispusta iznosi $\approx 300 \text{ g/m}^2/\text{godina}$ u slučaju primjene mehaničkog predtretmana, odnosno $\approx 25 \text{ g/m}^2/\text{godina}$ u slučaju primjene drugog stupnja pročišćavanja na oba UPOV-a.

Ključne riječi: priobalne aglomeracije, podmorski ispust, suspendirana tvar, numerički model

1. UVOD

Očuvanje kakvoće mora i zaštita rekreacijskih zona u području hrvatskog priobalja predstavlja važnu civilizacijsku zadaću. Razvoj turističkih aktivnosti i samih urbanih aglomeracija povećava i pritisak na morski recipijent u smislu pojačanog upuštanja otpadnih voda u morski recipijent. Jedan od načina dispozicije otpadnih voda u priobalnim područjima je i izvedba dugih

podmorskih ispusta s primjenom odgovarajućeg stupnja pročišćavanja na pripadnim UPOV-ima.

U Hrvatskoj postoji inženjerska praksa da udaljenost samog mjesta ispuštanja pročišćenih voda kroz difuzore podmorskih ispusta ne bude manja od 500 metara od obale, a dubina ispuštanja ne manja od 30 metara. Tu, u svakom slučaju pozitivnu dosadašnju praksu, nije moguće u potpunosti ispuniti pri projektiranju i izvođenju svakog

podmorskog ispusta. Uzimajući u obzir realna stanja morskog recipijenta, koja tijekom ljetnog razdoblja sprečavanja dostizanja nedozvoljenih koncentracija kemijskih ili bioloških onečišćenja u priobalnom pojasu (djelovanje morskih struja i vertikalni profil termohalinih svojstava), moguće je razlučiti pojedinačne situacije za koje je prihvatljiv prethodni mehanički predtretman, prvi ili drugi stupanj pročišćavanja na pripadnom UPOV-u.

Za aglomeracije s procijenjenim opterećenjem onečišćenja manjim od 10000 ES, te ispuštanjem u neosjetljive priobalne vode (prijemno tijelo), Direktiva o otpadnim vodama (čl. 7) zahtijeva ispuštanje uz odgovarajući stupanj pročišćavanja. U Direktivi se "odgovarajuće pročišćavanje" definira kao pročišćavanje komunalnih otpadnih voda bilo kojim procesom i/ili sustavom odlaganja koji nakon ispuštanja osigurava da prijemno tijelo zadovolji relevantne ciljeve kakvoće i relevantne odredbe te direktive i drugih direktiva zajednice.

Pri definiranju mehaničkog predtretmana kao "odgovarajućeg stupnja pročišćavanja" za ispuštanja u neosjetljive priobalne vode iz aglomeracija s manje od 10000 ES, treba obratiti pažnju na sljedeće:

- obzirom na općenitu jednoobraznost kakvoće priobalnih voda u Hrvatskoj, moglo bi se logički zaključiti da se isti standardi pročišćavanja moraju primjenjivati na cijeloj obali i u svim projektima (uređaja za pročišćavanje);
- u slučajevima gdje se utvrdi da mehanički predtretman zadovoljava zahtjeve usklađenosti, naknadna nadogradnja stupnja pročišćavanja ne smatra se investicijom za potrebe usklađivanja, osim ako priobalne vode ne budu naknadno klasificirane kao osjetljive, što može ograničiti dostupnost financiranja EU sredstvima;
- praksa primjene drugog stupnja pročišćavanja za sve veličine aglomeracija koje ispuštaju u priobalne vode primjenjuju se u UK i Švedskoj (UK-DEFRA, 2012.; Swedish EPA, 2016.).

U priobalnom području RH pojavljuje se 54 sustava javne odvodnje s opterećenjem od 2000 do 10000 ES. Preglednik Registra aglomeracija s prikazom rasporeda i obuhvata aglomeracija izrađen je u Hrvatskim vodama slijedom obveza iz Pravilnika o sadržaju, obliku i načinu vođenja vodne dokumentacije (Narodne novine, br. 120/10) i dostupan je zainteresiranim stručnim korisnicima kao web-aplikacija. U Registru su prikazani obuhvati preliminarno utvrđenih aglomeracija izrađeni 2010. godine u okviru Revidiranog plana provedbe vodno-komunalnih direktiva, uz naknadne manje korekcije obuhvata nastalih prvenstveno zbog izgradnje građevina sustava javne odvodnje u pojedinim aglomeracijama.

Uspostava odgovarajućih numeričkih modela cirkulacije mora i pronosa suspendirane tvari, u ovisnosti o primijenjenom stupnju pročišćavanja na pripadnom UPOV-u, omogućava procjenu intenziteta taloženja suspendirane tvari za šire područje uokolo difuzora podmorskog ispusta. Međutim, uspostava i provedba

simulacija s 3D numeričkim modelima cirkulacije mora i pronosa suspendirane tvari je složen i vremenski zahtjevan proces. Parametrizacija i formulacija početnih i rubnih uvjeta numeričkog modela uobičajeno se oslanja na podatke dobivene oceanografskim istražnim radovima, koji su također financijski i vremenski zahtjevni. Stoga je u sklopu ovdje prezentiranog istraživanja predložena pojednostavljena metodologija za provedbu analize pronosa suspendirane tvari unesene radom podmorskih ispusta sustava javne odvodnje priobalnih aglomeracija do 10000 ES.

2. PRISTUP MODELIRANJU

Uobičajena je praksa da se na lokaciji-trasi predviđenoj za polaganje morskog ispusta preliminarno provedu istraživački radovi koji, između ostalog, obuhvaćaju i mjerenje morskih struja u kontinuiranom razdoblju tijekom turističke sezone (V.-IX. mjesec), te vertikalnih profila temperature, saliniteta i gustoće mora u terminima polaganja i podizanja strujomjera. Provedba proračuna inicijalnog razrjeđenja u tzv. bliskoj zoni (Fisher et al., 1979.) oslanja se na izmjerene vertikalne razdiobe temperature, saliniteta i gustoće mora s CTD sondom. Ključni dio ovog dijela proračuna je i iznalaženje visine izdizanja oblaka onečišćenja od dna, odnosno određivanje terminalne dubine na kojoj se daljnje širenje oblaka onečišćenja nastavlja dominantno u horizontalnom smjeru kroz tzv. daleku zonu (Fisher et al., 1979.). S druge strane, izmjereni podatci sa strujomjerne postaje služe kao osnova za baždarnu proceduru u sklopu uspostave numeričkog modela strujanja i pronosa onečišćujućih tvari u dalekoj zoni.

2.1 Numerički model bliske zone

Za definiranje razrjeđenja i geometrijskih obilježja uzgorskog oblaka na kraju bliske zone uspostavljen je numerički model referenciran na rad Malačić (2001.). Model pretpostavlja inicijalno upuštanje u stratificirani ili nestratificirani morski recipijent kroz kružni otvor sapnice. Zanimljivo je utjecaj brzine strujanja i turbulencije recipijenta budući da je turbulencija u samom uzgorskom mlazu znatno intenzivnija (Fan i Brooks, 1966.; Featherstone, 1984.; Turner, 1986.). Modelom se analizira jedan uzgorski mlaz koji u cijelom području bliske zone nema interakciju s uzgorskim mlazovima iz susjednih sapnica. Korištenjem ovog modela proračunava se visina maksimalnog izdizanja oblaka onečišćenja od dna, odnosno dubina na kojoj se oblak onečišćenja opterećen suspendiranom tvari prenosi u model strujanja mora i pronosa suspendirane tvari u dalekoj zoni. Vladajuće jednadžbe za matematički opis promatranog problema detaljnije su razrađene u radu Lončar et al. (2010.).

Analizirani sustavi javne odvodnje Banjole, Premantura, Primošten, Dugi Rat, Bol, Gradac i Orebić

Tablica 1: Usvojena hidrauličko-geometrijska obilježja difuzora za ispuste sustava javne odvodnje Banjole, Premantura, Primošten, Dugi Rat, Bol, Gradac i Orebić, dubine na mjestu difuzora i proračunate vertikalne udaljenosti od dna do zone tranzicije iz bliske u daleku zonu (L_{DIF} duljina difuzora, Q protoci kroz cijevi podzemskih ispusta, v brzine upuštanja iz cijevi podzemskih ispusta u morski recipijent, d promjeri sapnica-otvora difuzora, n ukupni broj sapnica uzduž difuzorske dionice, h dubina na mjestu difuzora podzemskih ispusta, h_{TER} vertikalna udaljenost odizanja oblaka onečišćenja od dna (terminalna dubina)).

| | ES (1) | LDIF (m) | Q (m ³ /s) | v (m/s) | d (m) | n (1) | h (m) | hTER (m) |
|-------------------|--------|----------|-----------------------|---------|-------|-------|-------|----------|
| Banjole | 9000 | 40 | 0.06 | 1.5 | 0.10 | 5 | 37 | 9.0 |
| Premantura | 8000 | 35 | 0.04 | 1.7 | 0.08 | 5 | 33 | 8.0 |
| Primošten | 9000 | 50 | 0.06 | 3.0 | 0.06 | 7 | 71 | 12.3 |
| Dugi Rat | 8900 | 40 | 0.06 | 2.5 | 0.08 | 5 | 54 | 11.6 |
| Bol | 6600 | 40 | 0.06 | 2.5 | 0.08 | 5 | 75 | 15.5 |
| Gradac | 8200 | 30 | 0.06 | 2.5 | 0.08 | 5 | 39 | 7.2 |
| Orebić | 8900 | 45 | 0.06 | 3.0 | 0.06 | 7 | 35 | 6.0 |

predviđaju dispoziciju voda kroz podzemne ispuste s pripadnim difuzorima. Pri proračunu difuzora osnovni ulazni parametar je maksimalni satni dotok (protok) Q na UPOV-u, dok projektantu ostaje izbor brzine upuštanja iz sapnica podzemskog ispusta v_{sap} (preporučeni raspon 1–3 m/s), promjera sapnice difuzora d_{sap} (preporučeni raspon 0.05–0.15 m) i međusobne udaljenosti sapnica l_{sap} (preporučeno da se osigura nemiješanje uzgonskih mlazova do terminalne visine izdizanja oblaka onečišćenja). Izborom navedenih parametara definiran je i ukupan broj sapnica uzduž difuzorske dionice ispusta n_{sap} i ukupna duljina difuzora L_{dif} . Za provedbu proračuna pronosa u bliskoj zoni analiziranih sustava usvojena su hidrauličko – geometrijska obilježja prikazana u tablici 1.

Za lokacije difuzora podzemskih ispusta analiziranih sustava Banjole, Premantura, Primošten, Dugi Rat, Bol i Gradac i Orebić na raspolaganju su podatci o vertikalnim razdiobama temperature, saliniteta i gustoće mora temeljem mjerenja s CTD sondom na pripadnim oceanografskim postajama (HHI, 2000., 2004., 2006., 2007., 2013.). Usvajanjem izmjerenih vertikalnih raspodjela gustoće mora, te hidrauličko-geometrijskih obilježja difuzora i dubina na mjestu difuzora podzemskih ispusta (tablica 1), proračunate su dubine prelaska iz bliske u daleku zonu (slika 1). Primjerice, u hidrografskim uvjetima pulskog akvatorija za termin

4. 8. 2013. (slika 2) terminalne dubine oblaka onečišćenja (kraj bliske zone – prelazak u daleku zonu) iznose: $d_{term-Banjole} = 29$ m, $d_{term-Premantura} = 25$ m (vidi sliku 1).

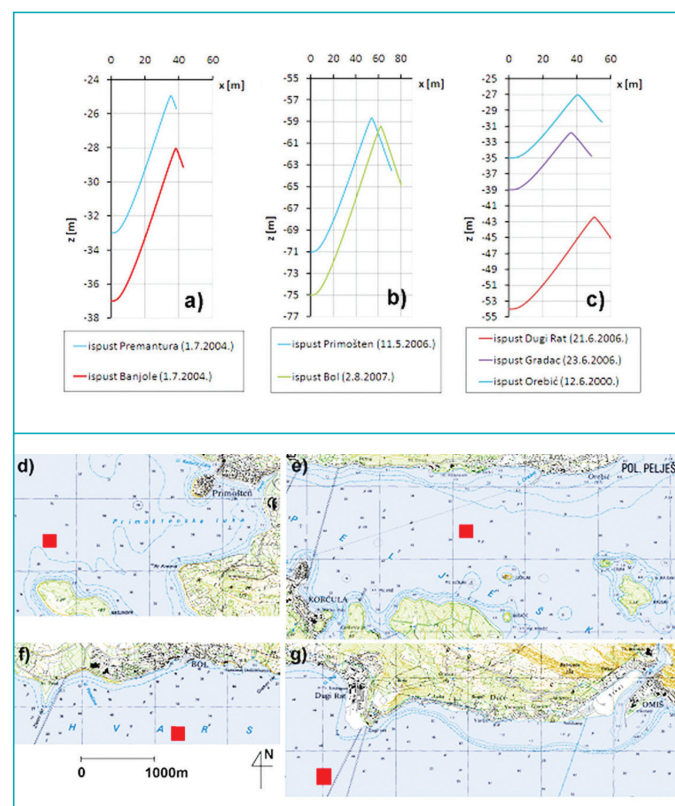
2.2 Nestacionarnost koncentracije suspendirane tvari

Primijenjen je nestacionarni režim rada podzemskih ispusta (pulsevi upuštanja), definiran maksimalnim satnim protocima i odgovarajućim koncentracijama suspendiranih čestica. Na slici 3 prikazana je usvojena varijacija satnih dotoka na UPOV-u Premantura s pripadnom dinamikom pulseva upuštanja $Q_{premantura} = 0.042$ m³/s. Prikazana

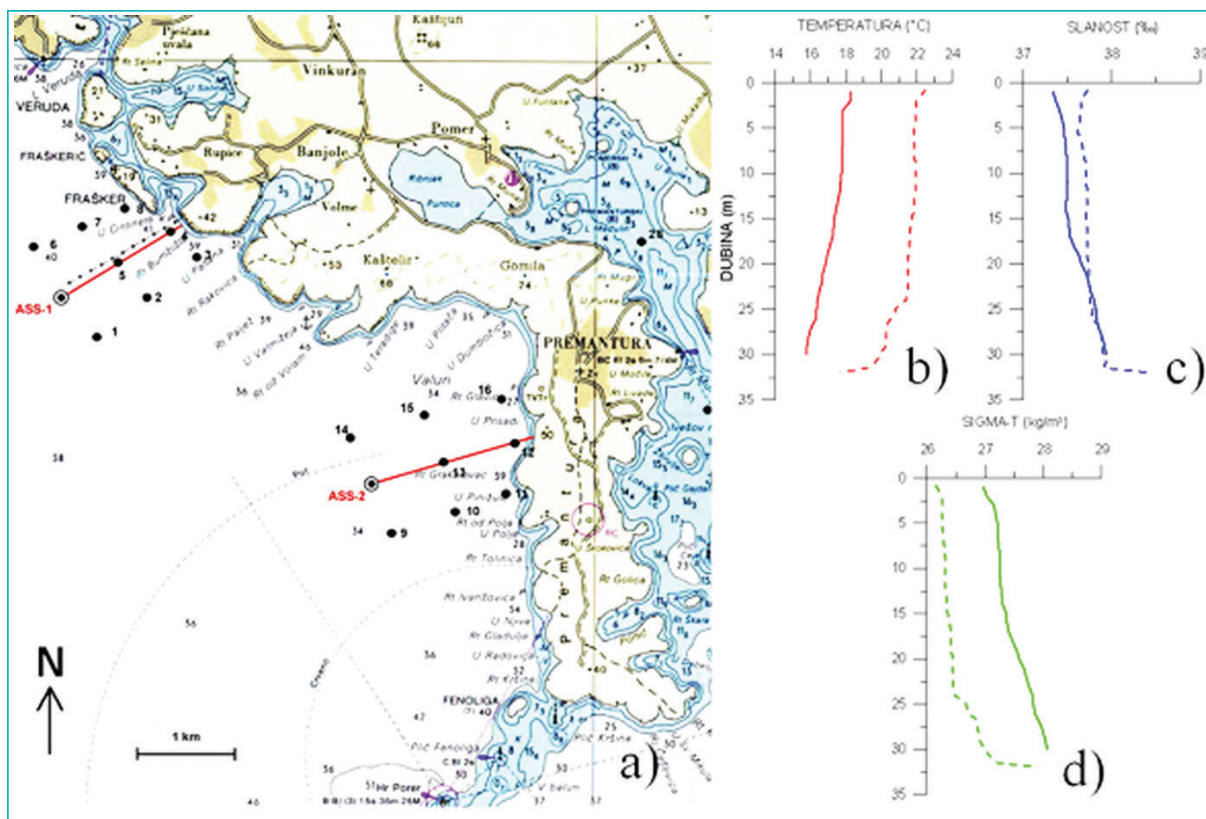
varijacija odnosi se na karakteristični dan ljetnog razdoblja u kojem projektirani maksimalni satni dotok na UPOV-u

Premantura odgovara projektiranom protoku kroz cijev podzemskog ispusta $Q_{premantura}$.

Za varijaciju koncentracije suspendirane tvari tijekom dana korištena je raspodjela prikazana na slici 4 (Metcalf & Eddy / Aecom, 2014.), a koja se odnosi na mehanički predtretman i drugi stupanj pročišćavanja. Primjenom drugog stupnja pročišćavanja na UPOV-u



Slika 1: Središnje strujnice uzgonskih mlazova kroz područje bliske zone za podzemne ispuste analiziranih sustava javne odvodnje (a,b,c) te pozicije difuzora podzemskih ispusta Primošten (d), Orebić (e), Bol (f) i Dugi Rat (g) (pozicije difuzora podzemskih ispusta Banjole i Premantura prikazani su na slici 2).



Slika 2: Shematski prikaz trasa ispusta otpadnih voda Banjole i Premantura (a) s pozicijama CTD postaja ASS-1 ($44^{\circ}48.6' N$; $13^{\circ}50.7' E$; dubina 37m) i ASS-2 ($44^{\circ}47.5' N$; $13^{\circ}53.3' E$; dubina 33m) te izmjerenim vertikalnim raspodjelama temperature (b), saliniteta (c) i gustoće mora (d) na CTD postaji ASS-2 u terminima 3.6.2004. (puna linija) i 1.7.2004. (iscrtkana linija) (HHI, 2004.).

ostvaruje se 90% smanjenje koncentracije (Zhang, 2007.) Osim koncentracije bitan je podatak i granulometrija suspendirane tvari. Usvajena je podjela na pet razreda (frakcija), pri čemu svaka od frakcija ima učešće od 20% ukupnog sadržaja. Podjela razreda frakcija s pripadnim referentnim promjerima zrna suspendirane tvari, ovisno o primjeni stupnja pročišćavanja na pripadnom UPOV-u, dana je u tablici 2 (Zhang, 2007.). U tablici su prikazane i brzine tonjenja čestica po frakcijama.

3. POJEDNOSTAVLJENA METODOLOGIJA ZA PRORAČUN PRONOSA SUSPENDIRANE TVARI

Pojednostavljenje u modeliranju pronosa suspendirane tvari moguće je temeljem usvajanja sljedećih spoznaja i pretpostavki:

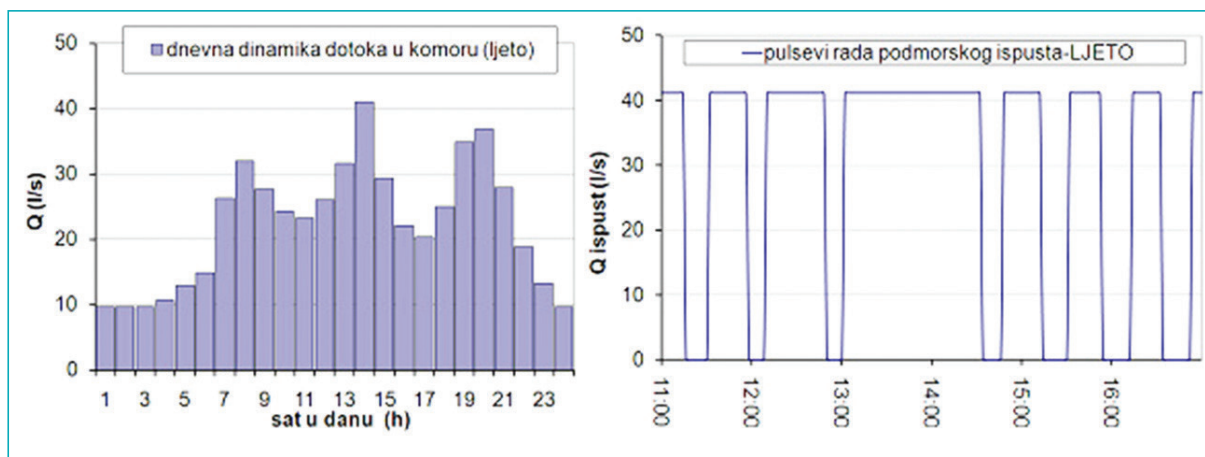
- odvajanje (tonjenje i sedimentacija) suspendiranih čestica iz oblaka onečišćenja nastalog radom podmorskog ispusta sustava javne odvodnje ima bitnu ulogu samo u području daleke zone (Cuthbertson i Davies, 2008.);
- promjene temperature i saliniteta mora u pridnom dijelu stupca mora su blage (slika 2), te imaju zanemariv utjecaj na promjenu brzine tonjenja suspendiranih čestica;
- izdizanje oblaka onečišćenja u bliskoj zoni odvija se u pridnom sloju mora (8-10 m od dna, slika

1), te se pretpostavlja barotropno strujanje s logaritamskim profilom brzina u vertikali;

- najintenzivnije taloženje suspendirane tvari pojavljuje se u bliskoj okolici difuzorskog dijela podmorskog ispusta u kojoj su dubine približno jednolike.

Slijedom navedenog, za praćenje taloženja suspendiranih čestica u dalekoj zoni dovoljno je promatrati homogeni sloj mora (TS konstantno u horizontalnom i vertikalnom smjeru) s dubinom koja odgovara visini izdizanja uzgorskog oblaka u području bliske zone (8 m za slučaj sustava Premantura, vidi slika 1 i tablica 1). Usvajanje pretpostavki o homogenoj dubini na širem akvatorijalnom području i izdizanju oblaka onečišćenja u bliskoj zoni samo kroz pridni sloj mora predstavljaju kritične pretpostavke u ovoj pojednostavljenoj metodologiji, a mogućnost njihovog prihvaćanja testira se u nastavku.

Za potrebe modeliranja nestacionarnog polja strujanja i pronosa čestica suspendirane tvari u dalekoj zoni, po pojednostavljenoj metodologiji, odabrana je kvadratna prostorna domena s duljinom stranice 3000 m (slika 5). Fizički rubovi domene ujedno predstavljaju i otvorene granice (nema nepropusnih granica – obala). Modelska prostorna domena diskretizirana je strukturiranim mrežom konačnih volumena s ćelijama (volumenima) dimenzija 100m x 100m u horizontalnom smjeru i dubinom koja odgovara vertikalnoj udaljenosti izdizanja oblaka onečišćenja od dna (primjerice 8 m za slučaj sustava Premantura).

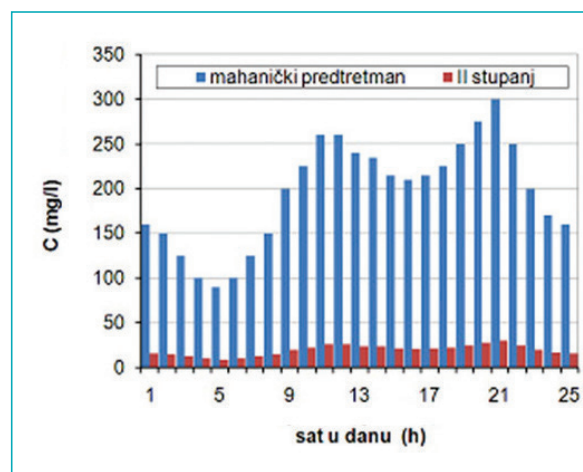


Slika 3: Varijacija satnih dotoka na UPOV Premantura (lijevo) i trajanje pulseva upuštanja $Q_{\text{Premantura}} = 0.042 \text{ m}^3/\text{s}$ (desno) u sekvenci ljetnog dana s vršnim opterećenjem.

Polje strujanja za prostornu domenu sa slike 5 dobiveno je primjenom numeričkog modela Mike 21fm (www.dhigroup.com) s kojim se proračunava dvodimenzionalno (u horizontalnoj ravnini) nestacionarno tečenje nestlačive tekućine u jednom vertikalnom homogenom sloju uz pretpostavku hidrostatske razdiobe tlaka. Detaljniji opis vladajućih jednadžbi i primijenjenog rješavatelja (solvera) dan je u radu Lončar et al. (2012.).

Nadgradnja osnovnog modela hidrodinamike (strujanja) dobivena je implementacijom modula za pronos sitnozrnih čestica suspendirane tvari. Suspendirana tvar je prezentirana skupom sitnih diskretnih Lagrangeovih čestica, inicijalno unesenih u prostornoj koordinati 0,0 (vidi sliku 5). Članovi konvekcije proračunavaju se na bazi brzina strujanja dobivenih iz hidrodinamičkog dijela modela, dok je utjecaj turbulentne difuzije tretiran kao slučajni i neovisan Markovljev proces (Gardiner, 1985.). Nakon unosa čestice prate se njeni relativni diskretni pomaci kroz stacionarni referentni koordinatni sustav u funkciji vremena, a proračunata distribucija gustoće skupa čestica interpretira se kao koncentracija suspendirane tvari. Pomaci, odnosno transport čestica, proračunava se prema metodologiji slučajnog koraka (eng: random walk) u kojoj se rješavaju Fokker-Planck-ova i Langevin-ova jednadžba (Gardiner, 1985.; Kloeden i Platen, 1995.). Vladajuće jednadžbe za matematički opis promatranog problema detaljnije su razrađene u radu Lončar et al. (2012.). Dinamika protoka (upuštanja) suspendirane tvari s pripadnim koncentracijama objašnjena je u poglavlju 2.2.

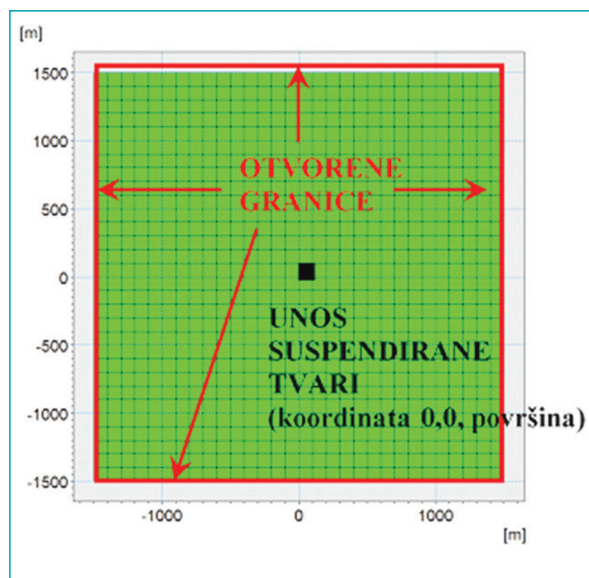
Potrebno je napomenuti da prezentirani pristup znatno pojednostavljuje provedbu analize pronosa suspendirane tvari unesene radom podmorskog ispusta sustava javne odvodnje u odnosu na pristup koji bi obuhvatio 3D prostornu domenu s realnom batimetrijom i odgovarajućim modelskim forsiranjem (plimni signal, djelovanje vjetera i toplinske izmjene na kontaktu s atmosferom te utjecaj prostorne i vremenske varijabilnosti temperature i saliniteta mora).



Slika 4: Primijenjena varijacija koncentracije suspendirane tvari tijekom dana za mehanički predtretman i drugi (II.) stupanj pročišćavanja (Metcalf&Eddy/Aecom, 2014.; Zhang, 2007.).

Tablica 2: Podjela frakcija čestica suspendirane tvari s pripadnim referentnim promjerima zrna u ovisnosti o primijenjenom stupnju pročišćavanja na pripadnom UPOV-u (Zhang, 2007.)

| frakcija | raspon pomjera čestice d (μm) | brzina tonjenja (m/s) | Predtretman na UPOV-u | |
|----------|--|-----------------------|------------------------------------|------------|
| | | | dref (μm) | učešće (%) |
| 1 | 1-10 | $2.3\text{e-}5$ | 5 | 20 |
| 2 | 10-20 | $1.6\text{e-}4$ | 15 | 20 |
| 3 | 20-40 | $6.0\text{e-}4$ | 30 | 20 |
| 4 | 40-80 | $2.5\text{e-}3$ | 60 | 20 |
| 5 | 80-400 | $2.7\text{e-}2$ | 250 | 20 |
| | | | II. stupanj na UPOV-u | |
| frakcija | raspon pomjera čestice d (μm) | brzina tonjenja (m/s) | d_{ref} (μm) | učešće (%) |
| 1 | 1-3 | $1.8\text{e-}5$ | 2 | 20 |
| 2 | 3-8 | $2.5\text{e-}5$ | 6 | 20 |
| 3 | 8-20 | $1.6\text{e-}4$ | 15 | 20 |
| 4 | 20-40 | $6.0\text{e-}4$ | 30 | 20 |
| 5 | 40-100 | $3.4\text{e-}3$ | 70 | 20 |



Slika 5: Modelska prostorna domena s pripadnom diskretizacijom za provedbu numeričkih simulacija strujanja i taloženja (pronosa) suspendirane tvari u području daleke zone (homogena dubina 8 m za slučaj ispusta Premantura).

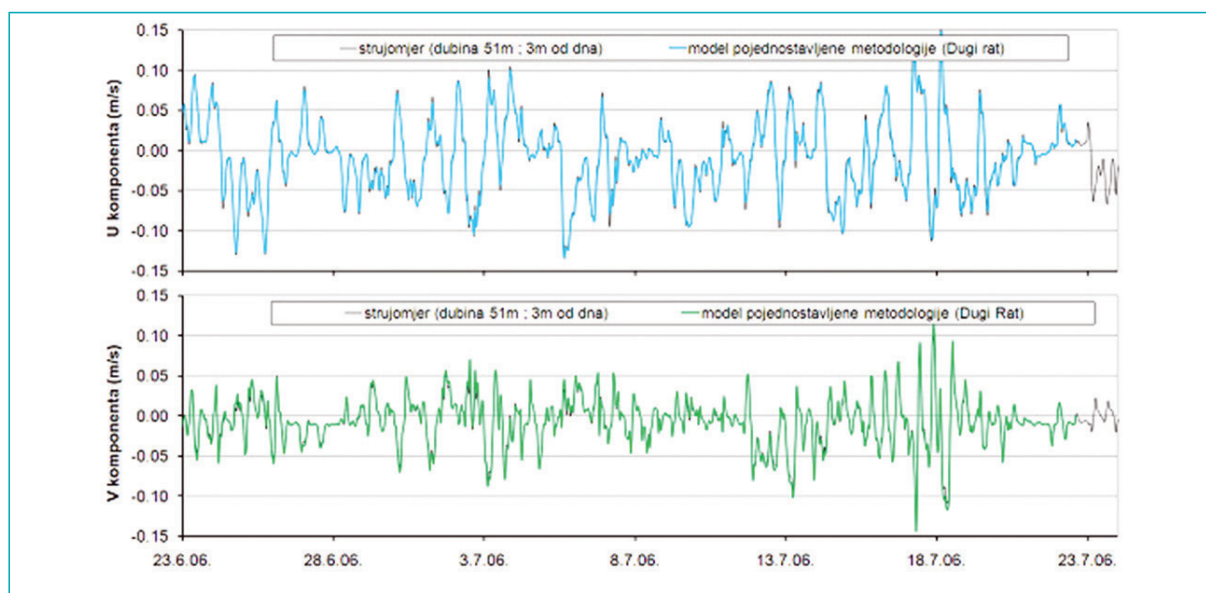
Za lokacije difuzorskih sekcija podmorskih ispusta analiziranih sustava Banjole, Premantura, Primošten, Dugi Rat, Bol, Gradac i Orebić na raspolaganju su datoteke s izmjerenim brzinama struja u kontinuiranom razdoblju od mjesec dana tijekom ljetnog razdoblja (HHI, 2000., 2004., 2006., 2007.). Na otvorenim granicama (slika 5) postavljene su vremenske serije protoka s varijacijom intenziteta prema izmjerenoj dinamici morskih struja.

Slika 6 prikazuje usporedbu izmjerene brzine struja sa strujomjerom RCM-7/AANDERAA na poziciji krajnje točke ispusta Dugi Rat (44°25.89' N ; 16°38.44' E ;

dubina 54m ; HHI, 2006.) na 3 m od dna i brzine struja za inicijalnu poziciju unosa suspendirane tvari na koordinati $x = y = 0$ m u modelu pojednostavljene metodologije. Usporedba brzina ukazuje na visoki stupanj korelacije, odnosno ukazuje na potencijalnu mogućnost direktne primjene izmjerenih brzina struja sa strujomjernih postaja (ukoliko su na raspolaganju) za sintezu rubnih uvjeta 2D pojednostavljenog modela.

Obzirom da se tijekom godine mijenja vertikalna raspodjela temperature i saliniteta mora, izdizanje oblika onečišćenja od dna također varira. Prihvatljivost usvojene pretpostavke o konstantnoj terminalnoj dubini prelaska u daleku zonu testirana je na primjeru CTD mjerne postaje smještene u akvatoriju grada Pule (44°51.27' N ; 13°46.58' E ; dubina 37m). Mjerenje vertikalne raspodjele temperature i saliniteta mora provedeno je u 7 termina tijekom 2007. i 2008. godine (slika 6, Andročec et al., 2009.). Primjenom modela pronosa tvari u području bliske zone za ispuš Premantura (poglavlje 2.1), te izmjerenih vertikalnih raspodjela temperature i saliniteta mora sa slike 7, dobiven je hodogram dubina izdizanja oblaka onečišćenja za kontinuirano razdoblje 1.11.2007. – 15.10.2008. (slika 8). Za razdoblja između termina mjerenja s CTD sondom u modelu je korištena linearna interpolacija.

Sa slike 8 je razvidno da se dubina izdizanja pojavljuje u rasponu od 7 do 19 m tijekom cjelokupnog simulacijskog razdoblja od godine dana. Tijekom razdoblja pola-sezone (V.–VI. i IX.–X. mjesec) i visoke sezone (VII.–VIII. mjesec) pulsevi upuštanja kroz podmorski ispuš su višestruko učestaliji od razdoblja mrtve sezone (I.–IV. i XI.–XII. mjesec). Zbog toga najveći dio unešenih sitnozrnih čestica počinje sedimentaciju u relativno uskom rasponu vertikalnih udaljenosti od dna (visina odizanja 7 – 10 m, slika 8). Ovakvi rezultati potvrđuju racionalnost usvojene pretpostavke



Slika 6: Usporedba izmjerene i satno usrednjene brzine struja za krajnju točku ispusta Dugi Rat (44°25.89' N ; 16°38.44' E ; dubina 54m ; HHI, 2006.) na 3 m od dna i brzine struja za inicijalnu poziciju unosa suspendirane tvari na koordinati $x = y = 0$ m u modelu pojednostavljene metodologije (gore – u komponenta strujanja ; dole v komponenta strujanja).

o maloj varijaciji visine izdizanja oblaka onečišćenja u sklopu iznesene pojednostavljene metodologije.

4. REZULTATI NUMERIČKIH SIMULACIJA PRONOSA SUSPENDIRANE TVARI

Provedene su numeričke simulacije za rad pojedinačnih podmorskih ispusta prema predloženoj pojednostavljenoj metodologiji te su dobivena proračunska polja istaložene suspendirane tvari.

Na slici 9 prikazana su polja mase istaloženih čestica uslijed sedimentacije suspendirane tvari pri radu ispusta Primošten, Dugi Rat, Bol, Gradac i Orebić (UPOV mehanički predtretman i II. stupanj) na kraju simulacijskog razdoblja od mjesec dana tijekom ljetne sezone. Prikaz je dan za dvije analizirane varijante: pri radu ispusta vezanog uz UPOV s drugim stupnjem pročišćavanja i UPOV s mehaničkim predtretmanom. Maksimalne vrijednosti mase istaloženih suspendiranih čestica (g/m^2) po analiziranim sustavima i stupnju pročišćavanja prikazane su u tablici 3.

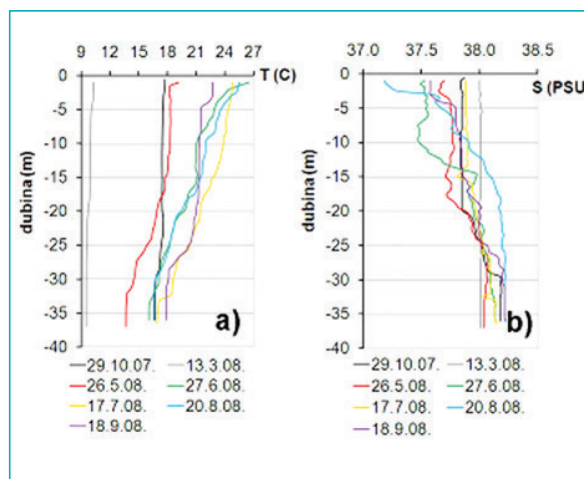
Ukoliko se želi napraviti projekcija za cijelu godinu, moguće je usvojiti tri karakteristične sezone: mrtva sezona (I.-IV. i XI.-XII. mjesec), polu-sezona (V.-VI. i IX.-X. mjesec) te visoka sezona (VII.-VIII. mjesec). Obzirom na neravnomjernost dotoka suspendirane tvari na UPOV tijekom godine, količina dnevnog dotoka u mrtvoj sezoni je $\approx 25\%$, odnosno u polu-sezoni 45% od visoke sezone. Nadalje, trajanje mrtve sezone je 181 dan, polu-sezone 122 dana, a visoke sezone 62 dana. Umnoškom dnevnog dotoka po sezonama s pripadnim brojem dana u sezoni dobiva se postotno učešće pojedine sezone u ukupnom dotoku na UPOV kroz cijelu godinu: 26% ukupnog godišnjeg dotoka pripada mrtvoj sezoni, 36%

Tablica 3: Maksimalne vrijednosti mase istaloženih suspendiranih čestica (g/m^2) po analiziranim sustavima i stupnju pročišćavanja na kraju simulacijskog razdoblja od mjesec dana tijekom ljetne sezone.

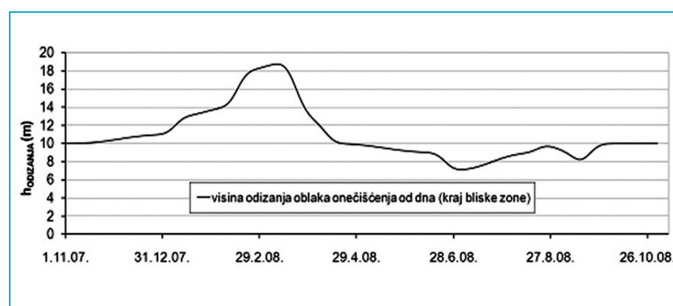
| | meh. predtret. | II. stupanj |
|------------|----------------|-------------|
| Banjole | 115 | 3 |
| Premantura | 75 | 3 |
| Primošten | 146 | 5 |
| Dugi Rat | 121 | 4 |
| Bol | 117 | 4 |
| Gradac | 176 | 10 |
| Orebić | 100 | 2 |

Tablica 4: Procijenjene godišnje količine dotoka suspendirane tvari na UPOV-e, unosa suspendirane tvari putem ispusta i istaložene suspendirane tvari u akvatoriju sustava Banjole i Premantura.

| | meh. predtret. | II. stupanj |
|---|----------------|-------------|
| DOTOK _{BANJOLE+PREMANTURA} (t/god) | 193 | 193 |
| UNOS _{BANJOLE+PREMANTURA} (t/god) | 193 | 19.3 |
| TALOŽENJE _{BANJOLE+PREMANTURA} (t/god) | 105 | 7.2 |



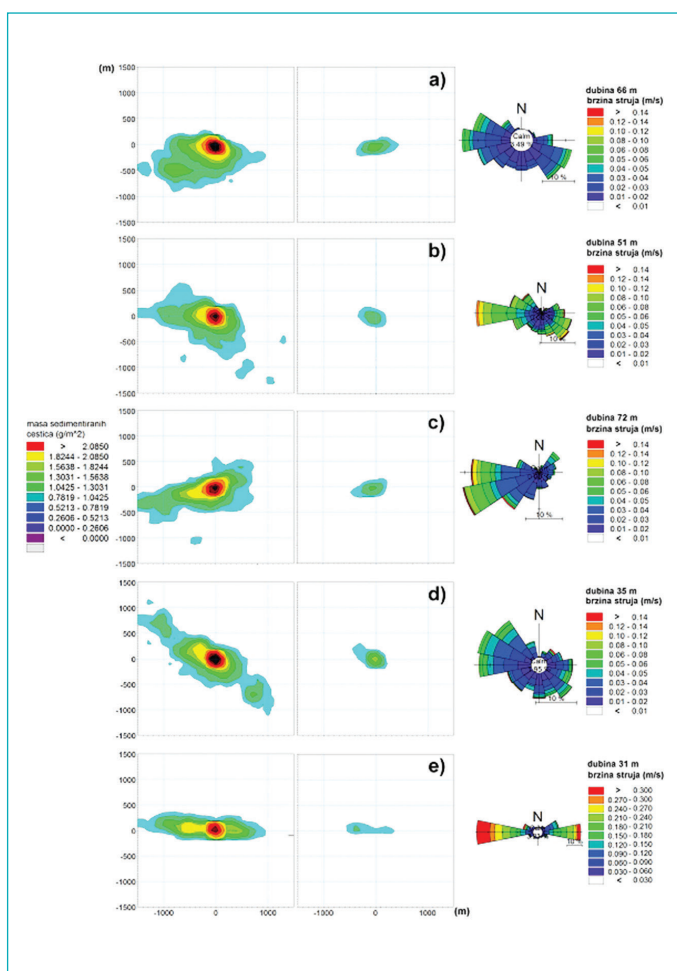
Slika 7: Izmjerene vertikalne raspodjele temperature (a) i saliniteta (b) mora na CTD postaji u pulskom akvatoriju ($44^{\circ}51.27'N$; $13^{\circ}46.58'E$) u 7 termina tijekom 2007. i 2008. godine.



Slika 8: Hodogram dubina izdizanja oblaka onečišćenja dobiven primjenom modela pronosa tvari u području bliske zone i izmjerenih vertikalnih raspodjela temperature i saliniteta mora na CTD postaji u pulskom akvatoriju.

pripada polu-sezoni, 38% pripada visokoj sezoni. Tako bi, primjerice, godišnji dotok suspendirane tvari na UPOV Banjole iznosio 120 t, a na UPOV Premantura 73 t. Kako je to već prethodno navedeno, u simulacijama s mehaničkim predtretmanom na UPOV nema redukcije suspendirane tvari (dotok = unos), dok UPOV s drugim stupnjem pročišćavanja omogućuje smanjenje unosa suspendirane tvari, obzirom na dotok od 90% . Prema tome, nakon provedbe numeričke analize taloženja suspendirane tvari za razdoblje od mjesec dana u visokoj sezoni, uz usvajanje navedenih postotaka učešća u godišnjem unosu, moguće je procijeniti godišnju količinu istaložene suspendirane tvari. Za konkretan slučaj promatranih sustava Banjole i Premantura procijenjene godišnje količine istaložene suspendirane tvari prikazane su u tablici 4.

Vrijednosti prikazane u tablici 4 upućuju na zaključak da se u području analiziranog akvatorija istaloži oko 55% od ukupno unesene suspendirane tvari kroz podmorske ispuste sustava javne odvodnje s mehaničkim predtretmanom na UPOV-ima. U slučaju da se UPOV-i Banjole i Premantura izvedu s drugim stupnjem pročišćavanja, istaložit će se oko 37% od unesene suspendirane tvari, odnosno 4% od dotoka na UPOV.



Slika 9: Polja mase istaloženih čestica uslijed sedimentacije suspendirane tvari pri radu ispusta Primošten (a), Dugi Rat (b), Bol (c), Gradac (d) i Orebić (e) (lijevo – UPOV mehanički predtretman; desno – UPOV II. stupnja) na kraju simulacijskog razdoblja od mjesec dana tijekom ljetne sezone (primjena pojednostavljene metodologije) i ruže strujanja za planirane pozicije difuzora podzemskih ispusta (koordinata 0,0 odgovara poziciji difuzora podzemskog ispusta naznačenog s crvenim kvadratom na slikama 1 d,e,f,g).

5. ZAKLJUČAK

Provedeno je numeričko modelsko istraživanje pronosa suspendirane tvari koja se upušta u more kroz podzemne ispuste sustava javne odvodnje priobalnih aglomeracija od 2000 do 10000 ES, za koje do sada nije definiran odgovarajući stupanj pročišćavanja na UPOV. Analizirane su situacije unosa suspendirane tvari s koncentracijama koje odgovaraju uvjetima mehaničkog predtretmana i drugog stupnja pročišćavanja.

U numeričkim modelima preporuča se korištenje realne dnevne dinamike rada podzemskog ispusta s odgovarajućim protocima/brzinama upuštanja u morski recipijent i s pripadnim koncentracijama suspendirane tvari. Za analizu širenja onečišćenja u području bliske zone preporuča se primjena numeričkog modela za praćenje koncentracije onečišćenja i geometrijskih obilježja uzgonskog oblaka

sve do prekida njegovog izdizanja i tranzicije u područje daleke zone. Procesi daljnjeg širenja sitnozrnih čestica suspendirane tvari u području daleke zone tretirani su 2D numeričkim modelima strujanja i konvektivne disperzije, uključujući proces taloženja.

Dobiveni rezultati daju komparativni uvid u količinu istaloženih čestica u analiziranim akvatorijima, ovisno o slučaju primjene mehaničkog predtretmana ili drugog stupnja pročišćavanja na UPOV-ima. U slučaju primjene mehaničkog predtretmana na UPOV, maksimalne količine istaložene suspendirane tvari (sloj istaloženih čestica na dnu u bliskoj okolici difuzora) nakon mjesec dana kontinuiranog rada UPOV-a u vrhu turističke sezone (VIII. mjesec) kreću se u rasponu 75 (sustav Premantura) – 176 g/m² (sustav Gradac). U slučaju izvedbe drugog stupnja pročišćavanja na UPOV-ima, maksimalne količine istaloženih čestica suspendirane tvari kreću se u rasponu 2 (sustav Orebić) – 10 g/m² (sustav Gradac).

Rezultati provedenih numeričkih simulacija pokazali su da se ≈ 60 % ukupno unesene suspendirane tvari taloži na dnu u slučaju primjene mehaničkog predtretmana na UPOV-ima, te ≈ 40 % u slučaju primjene drugog stupnja pročišćavanja. Prema tome, za slučaj proizvoljnog sustava za 10000 ES s unosom 100 t/god ukupne suspendirane tvari primjena mehaničkog predtretmana rezultira sedimentacijom sitnozrnih čestica od 60 t/god, dok drugi stupanj pročišćavanja omogućuje redukciju taloženja sitnozrnih čestica na razinu od 4 t/god. Nadalje, najveće opterećenje dna talogom sitnozrnih česticama pojavljuje se u neposrednoj okolici difuzora podzemskog ispusta, pri čemu se za sustave do 10000 ES može očekivati opterećenje ≤ 300 g/m²/godina u slučaju primjene mehaničkog predtretmana, odnosno ≤ 25 g/m²/godina u slučaju primjene drugog stupnja pročišćavanja na UPOV-ima.

Modelski rezultati i predložena pojednostavljena metodologija proračuna prostorno-vremenskog razvoja pridnenog sloja istaloženih čestica (mulja) mogu pomoći u izboru odgovarajućeg stupnja pročišćavanja za sustave javne odvodnje koji pripadaju kategoriji priobalnih aglomeracija do 10000 ES s ispuštanjem u područje normalnog (neosjetljivog) mora.

Osim zaključaka vezanih uz rezultate provedbe hidrauličkih proračuna također je bitno sagledati i troškove izgradnje, pogona i održavanja (razdoblje 30 godina) razmatranih varijantnih rješenja. Tako na primjer za UPOV-e Premantura i Banjole troškovi izgradnje, pogona i održavanja iznose 28.280.000 kn, uz primjenu mehaničkog predtretmana, te 87.164.000 kn u slučaju drugog stupnja pročišćavanja.

Uzimajući u obzir proračunate količine taloga sitnozrnih čestica i potrebne investicije za smanjenje, te količine kroz izvedbu drugog stupnja pročišćavanja na UPOV-ima, može se zaključiti da se mehanički predtretman može usvojiti kao odgovarajući stupanj pročišćavanja za analizirane sustave javne odvodnje do 10000 ES. ■

LITERATURA

- Androćec, V.; Beg-Paklar, G.; Dadić, V.; Djakovac, T.; Grbec, B.; Janeković, I.; Krstulović, N.; Kušpilić, G.; Leder, N.; Lončar, G.; Marasović, I.; Precali, R.; Šolić, M. (2009.): The Adriatic Sea Monitoring Program – Final Report, MCEPP, Zagreb.
- Cuthbertson, A.; Davies, P. (2008.): Deposition from Particle-Laden, Round, Turbulent, Horizontal, Buoyant Jets in Stationary and Coflowing Receiving Fluids, *J. Hydraul. Eng.*, 134(4), str. 390–402.
- Fan, L.N.; Brooks, N.H. (1966.): Horizontal jets in stagnant fluid of other density, *J. Hydraul. Divn.*, ASCE 92, str. 423–429.
- Featherstone, R.E. (1984.): Mathematical models of the discharge of wastewater into a marine environment, In: James, A. (Ed.), *An Introductory to Water Quality Modelling*, first ed. Wiley, Chichester, str. 150–162.
- Fischer, H.B., List, E.J.; Koh, R.; Imberger, J.; Brooks, N.H. (1979.): *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, 483 str.
- Gardiner, C.W. (1985.): *Handbook of stochastic methods for Physics Chemistry and Natural Science*, Springer-Verlag, Berlin. 409 str.
- Hrvatski hidrografski institut (2000.): *Rezultati istraživačkih radova trase podmorskog ispusta otpadnih voda sustava javne odvodnje naselja Orebić*, Split, 95 str.
- Hrvatski hidrografski institut (2004.): *Rezultati istraživačkih radova trase podmorskog ispusta otpadnih voda sustava javne odvodnje naselja Premantura*, Split, 97 str.
- Hrvatski hidrografski institut (2006.): *Rezultati istraživačkih radova trase podmorskog ispusta otpadnih voda sustava javne odvodnje naselja Primošten*, Split, 95 str.
- Hrvatski hidrografski institut (2006.): *Rezultati istraživačkih radova trase podmorskog ispusta otpadnih voda sustava javne odvodnje naselja Dugi Rat*, Split, 95 str.
- Hrvatski hidrografski institut (2006.): *Rezultati istraživačkih radova trase podmorskog ispusta otpadnih voda sustava javne odvodnje naselja Gradac*, Split, 95 str.
- Hrvatski hidrografski institut (2007.): *Rezultati istraživačkih radova trase podmorskog ispusta otpadnih voda sustava javne odvodnje naselja Bol*, Split, 95 str.
- Kloeden, P.; Platen, E. (1995.): *Numerical Solution of Stochastic Differential Equations*, Springer-Verlag, Berlin. 636 str.
- Lončar, G.; Matković, M.; Anroćec, V. (2010.): Numerička analiza pronosa efluenta iz podmorskog ispusta, *Hrvatske vode*, 18 (71), 1–11.
- Lončar, G.; Leder, N.; Paladin, M. (2012.): Numerical modelling of an oil spill in the northern Adriatic, *Oceanologia*, 54 (2), str. 143–173.
- Lončar, G.; Leder, N.; Paladin, M. (2012.): Periodi vlastitih oscilacija u akvatorijama Bakra, Malog Lošinja, Ista, Starog Grada i Vela Luke, *Hrvatske vode*, 20 (82), str. 201–210.
- Malačić, V. (2001.): Numerical modelling of the initial spread of sewage from diffusers in the Bay of Piran (northern Adriatic), *Ecological Modelling*, 138, str. 173–191
- Metcalf & Eddy / Aecom (2014.): *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, Fifth Edition, McGraw-Hill, 2018 str.
- Swedish EPA (2016.): *Wastewater treatment in Sweden*, www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/978-91-620-8416-5.pdf
- Turner, J.S. (1986.): Turbulent entrainment: the development of the entrainment assumption, and its application to geophysical flows, *J. Fluid Mech.*, 173, str. 431–471.
- UK Department for Environment, Food and Rural Affairs (2012.): *Waste water treatment in the United Kingdom – 2012, Implementation of the European Union Urban Waste Water Treatment Directive – 91/271/EEC*, Crown, London, 49 str.
- Zhang, Z.; Zhao, J.; Xia S.; Liu C.; Kang X. (2007.): Particle size distribution and removal by a chemical-biological flocculation process, *Journal of Environmental Sciences*, 19, str. 559–563.

Transfer of suspended solids from public wastewater systems below 10,000 PE with mechanical preliminary treatment and secondary treatment

Abstract. The paper present a methodological approach to the analysis of transfer and settlement of suspended solids on the sea bottom from public wastewater systems of up to 10,000 PE while focusing on a comparison between different technological solutions for wastewater treatment plants (WWTPs). The results of the proposed methodology based on numerical modelling of the transfer of suspended solids in the sea will show differences in the sea bottom load with fine-grained particle sediment due to the implementation of different treatment levels. This will facilitate the establishment of a methodological standard to support arguments in the debate whether mechanical preliminary treatment presents adequate treatment level in individual cases or not. The proposed methodology was applied to specific examples of the agglomerations Banjole, Premantura, Primošten, Dugi Rat, Bol, Gradac and Orebić (below 10,000 PE). The first variant analyses only mechanical preliminary treatment whereas the second one addresses secondary treatment on associated WWTPs. The results of the conducted research has shown that in the observed waters an average of 60 % of the total introduced suspended solids settle on the sea bottom from WWTPs with mechanical preliminary treatment, and 40 % if secondary treatment is implemented (with 90 % reduction in suspended solids at a WWTP). It was estimated that a maximum sea bottom load in the vicinity of submarine outfall diffusers equals $\approx 300 \text{ g/m}^2/\text{year}$ when mechanical preliminary treatment is implemented, and $\approx 25 \text{ g/m}^2/\text{year}$ if secondary treatment is implemented on both WWTPs.

Key words: coastal agglomerations, submarine outfall, suspended solids, numerical model

Schwebstofftransport aus dem öffentlichen Entwässerungssystem mit einer Ausbaugröße von bis zu 10000 EGW mit mechanischer Vorbehandlung und mit zwei Reinigungsstufen

Zusammenfassung. Im Artikel wird ein methodologischer Ansatz zur Analyse des Schwebstofftransports und der Ablagerung von Schwebstoffen aus dem öffentlichen Entwässerungssystem mit einer Ausbaugröße von bis zu 10000 EGW über den Meeresgrund dargestellt, mit dem Schwerpunkt auf den Vergleich verschiedener technischer an den Abwasserreinigungsanlagen angewandten Lösungen. Die Ergebnisse der hier vorgeschlagenen Methodologie, basiert auf numerischer Modellierung des Schwebstofftransports im Meer, zeigen Unterschiede in der Belastung des Meeresgrundes durch den Satz aus feinkörnigen Stoffen abhängig von der Anwendung verschiedener Reinigungsstufen. Auf Grund dieser Ergebnisse wird Festlegung eines methodologischen Standards ermöglicht für die Begründung oder Ablehnung der Stellungnahme, dass mit der mechanischen Vorbehandlung in einzelnen Situationen entsprechender Reinigungsgrad erzielt wird. Die vorgeschlagene Methodologie wurde an konkreten Beispielen, Verdichtungsräumen Banjole, Premantura, Primošten, Dugi Rat, Bol, Gradac und Orebić (Ausbaugröße bis zu 10000 EGW) dargestellt. In der ersten Variante wurde nur die Anwendung der mechanischen Vorbehandlung und in der zweiten Variante die Anwendung der zweiten Reinigungsstufe an den Abwasserreinigungsanlagen analysiert. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung zeigen, dass in diesen Seegebieten durchschnittlich 60% aller Schwebstoffe auf dem Meeresgrund abgelagert wird, wenn nur mechanische Vorbehandlung angewandt wird. Wenn die zweite Reinigungsstufe angewandt wird, wird 40% Schwebstoffe abgelagert, wobei die Verminderung der Schwebstoffe an den Abwasserreinigungsanlagen beträgt 90%. Es wird eingeschätzt, dass die maximale Meeresbodenbelastung in der Nähe vom Diffusor am Unterwasserauslauf $\approx 300 \text{ g/m}^2/\text{Jahr}$ im Falle der Anwendung der mechanischen Vorbehandlung, bzw. $\approx 25 \text{ g/m}^2/\text{Jahr}$ im Falle der Anwendung der zweiten Reinigungsstufe beträgt.

Schlüsselwörter: Küstenballungsräume, Unterwasserauslauf, Schwebstoffe, numerisches Modell