

UDK/UDC: 532.5:579.22(26.02)(497.4)

Prejeto/Received: 21.11.2018

Izvirni znanstveni članek – Original scientific paper

Sprejeto/Accepted: 07.01.2019

UPORABA METODE SLEDENJA DELCEV ZA MODELIRANJE TRANSPORTA IN ODMIRANJA BAKTERIJ *ESCHERICHIA COLI* V MORJU

USE OF THE PARTICLE TRACKING METHOD FOR MODELING THE TRANSPORT AND DECEASING OF *ESCHERICHIA COLI* IN THE SEA

Anja Lešek¹, Dušan Žagar^{1,*}

¹ Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, 1000 Ljubljana

Izveček

Obravnavamo modeliranje transporta in odmiranja bakterij *Escherichia coli* v morju. Iz ekstrapoliranih meritev okoljskih parametrov smo po Mancinijevi enačbi izračunali krajevno spremenljivi koeficient umrljivosti *E. coli*, ki vtekajo z Rižano v računsko območje, vzhodni del Koprškega zaliva. S predhodno izračunanimi hitrostnimi polji smo z modificiranim modelom sledenja delcev Nafta3D opravili dvodnevne simulacije izpusta delcev iz enega izvora in analizirali lokacije dveh vrst delcev – prostih bakterij (ECF) in bakterij, pričvrščenih na suspendirane delce (ECA). Nato smo po razpadni enačbi prvega reda in z izračunanimi koeficienti umrljivosti analizirali zmanjševanje aktivnosti ECA in ECF z novim modelom odmiranja *E. coli*. V danih razmerah velika večina ECA v 48 urah ostane na območju drugega bazena Luke Koper in potone v sloje vode ob dnu. Čas, ko odmre 90 % ECA (T_{90}), znaša približno 48 ur. ECF se v manjših globinah premikajo hitreje in drugi bazen Luke Koper pretežno zapustijo. T_{90} je pri hipnem izpustu enak 6 ur, pri kontinuirnem pa se podaljša na 10 ur, približno za čas izpusta.

Ključne besede: model, *E. coli*, Mancinijeva enačba, razpadna enačba prvega reda, transport, aktivnost, okoljski dejavniki, Koprski zaliv.

Abstract

We discuss modeling of the transport and decrease of bacteria *Escherichia coli* in marine environments. We calculated the spatially variable decrease coefficient of *E. coli* from the extrapolated measurement data on environmental parameters in accordance with Mancini's equation for bacteria stemming from the Rižana River and entering into the computational domain – the eastern part of the Koper Bay. Using pre-computed circulation data and the modified particle-tracking model Nafta3D we performed two-day simulations of an instantaneous and a continuous release from a single source. We analyzed locations of two particle types: free *E. coli* (ECF) and *E. coli* bound to suspended solids (ECA). We then analyzed the ECA and ECF activity decrease with a newly developed decrease model, applying a first-order kinetics equation. In the given conditions a vast majority of ECA remained in the second basin of the Port of Koper and sank to the bottom layers. The decrease time of 90% of the ECA (T_{90}) was about 48 hours. The ECF remained closer to

* Stik / Correspondence: dusan.zagar@fgg.uni-lj.si

© Lešek A., Žagar D.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0.](#)

© Lešek A., Žagar D.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – ShareAlike 4.0 Licence.](#)

<https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2018.08>

the surface; they moved more quickly and for the most part abandoned the second basin. The determined T_{90} was 6 and 10 hours in instantaneous and continuous release, respectively.

Keywords: model, *E. coli*, Mancini equation, first order kinetics, transport, activity, environmental parameters, Koper Bay.

1. Uvod

V prispevku obravnavamo gibanje, aktivnost in odmiranje bakterije *Escherichia coli* (krajše *E. coli*) v morskem okolju. *E. coli* je gramnegativna, fakultativno anaerobna, paličasta bakterija iz rodu Enterobacteriaceae. Celice bakterije so približno 2,0 μm dolge, premera 0,25–1,0 μm , volumna med 0,6 in 0,7 μm^3 in mase reda velikosti 10^{-15} kg. Najdemo jo v iztrebkih in črevesju toplokrvnih organizmov, a so lahko nekateri sevi bakterije za človeka patogeni (*Escherichia coli*, 2017). Za *E. coli* je značilno, da se v človeškem ali živalskem izločku ob aerobnih pogojih močno množi še tri dni, nato pa se njena prisotnost postopoma zmanjšuje zaradi vplivov okolja in drugih dejavnikov. Ker lahko bakterija zunaj telesa preživi le omejen čas, je ta organizem postal eden glavnih pokazateljev fekalne onesnaženosti vode in zemlje (Rozen in Belkin, 2001).

E. coli večinoma zaide v morje iz čistilnih naprav ter z odpadnimi vodami iz kanalizacijskega sistema. V morskem okolju najlažje pridemo v stik s fekalnim onesnaženjem ter posledično z bakterijo *E. coli* ob stiku s kopalnimi vodami in z zaužitjem neustrezno pridelane morske hrane, predvsem školjk.

Modeliranje mehanizmov odmiranja *E. coli* so prikazali že Martin et al. (1998), po tem pa so bili razviti modeli, ki so večinoma simulirali transport bakterij iz enega ali več virov (npr. Garcia-Barcina et al., 2002). Modeli transporta, ki bi hkrati obravnavali tudi odmiranje *E. coli* v morskem okolju, niso več redki. Napovedovanje vnosa in porazdelitve *E. coli* v morskem okolju s kombiniranimi 1D in 3D numeričnimi modeli opisujejo le De Marchis et al. (2013), dolgoročno napovedovanje koncentracij v kopalnih vodah obravnavajo npr. Palazon et al. (2017) in Huang et al. (2017), študija Bougeard et al. (2011) pa opisuje tudi vpliv na školjčičišča.

V raziskavi bomo izvedli simulacije gibanja in odmiranja bakterije na delu Koprškega zaliva, ki je na severu omejen z Debelim rtičem, na jugu pa z rtičem Petelin (slika 1). Tam se nahaja sedem uradnih območij kopalnih voda, več divjih plaž ter školjčičišče ob Debelem rtiču (Katalog plaž, 2017). Aktivnost bakterije izračunamo za vsako celico numerične mreže modela glede na dejavnike okolja. Podatki o glavnih dejavnikih zmanjševanja aktivnosti bakterije (slanost, temperatura, motnost in globina vode ter sončno sevanje) so bili izmerjeni na terenu in prostorsko interpolirani v računski domeni.

Predpostavljamo, da je mogoče obstoječi model Nafta3D, ki deluje po metodi sledenja delcev (MSD), nadgraditi tako, da bo z njim mogoče simulirati gibanje prosto plavajočih in na delce sedimenta vezanih bakterij ter vgraditi modul za simulacijo aktivnosti bakterij v odvisnosti od okoljskih parametrov. Cilji raziskave so torej: (1) nadgraditi obstoječi MSD-model Nafta3D (Žagar in Četina 2011), z modulom za določanje aktivnosti *E. Coli*; (2) simulirati lokacijo, aktivnost in starost bakterij v računski domeni na primeru enega izvora; in (3) kvalitativno preveriti delovanje modela. Po izvedenem umerjanju in validaciji bi lahko tak model služil za ugotavljanje dosega bakterij iz različnih možnih virov ali z dodatno modifikacijo tudi iskanju njihovega izvora..

2. Metode

2.1 Razpadna enačba prvega reda

Razpadna enačba prvega reda predstavlja najbolj razširjeno metodo za simulacije odmiranja mikroorganizmov v okolju:

$$N = N_0 e^{-Kt}, \quad (1)$$

kjer je N število mikroorganizmov v času t , N_0 število mikroorganizmov (bakterij *E. coli*) v začetnem času $t = 0$, K pa predstavlja eksponentno

stopnjo oz. koeficient umrljivosti [dan^{-1}] (Bitton, 1998).

2.2 Mancinijeva enačba

Z Mancinijevo enačbo (Mancini, 1978) opišemo koeficient umrljivosti K . Ta v modelu predstavlja povprečno stopnjo umrljivosti bakterije znotraj izbrane celice numerične mreže z znano globino, temperaturo in slanostjo. Zahtevana podatka sta še prosojnost (motnost) vodnega stolpca ter količina sončnega sevanja. Enačbo uporabljamo za prvi približek izračuna dejanskega števila koliformnih bakterij, torej vseh koliformnih bakterij, fekalnih koliformnih bakterij ali bakterije *E. coli* (Chan, 2010):

$$K = [0,8 + 0,006 * (\% \text{morske vode})] * 1,07^{(T-20)} + \frac{I_A}{k_e H} [1 - e^{-k_e H}] \quad (2)$$

K predstavlja koeficient umrljivosti [d^{-1}], T temperaturo vode [$^{\circ}\text{C}$], z I_A označimo povprečno intenzivnost sončnega sevanja na gladini [ly/h], s k_e koeficient pojemanja svetlobe [m^{-1}], s H pa globino premešanega sloja vode [m].

Koeficient pojemanja svetlobe k_e smo izračunali po enačbi (3):

$$k_e = \frac{a}{z_{\text{Secchi}}} \quad (3)$$

kjer pomeni A empirični koeficient – med 1,7 in 1,9, z_{Secchi} pa je Secchijeva globina v metrih – maksimalna globina, do katere je še vidna bela plošča pri merjenju Secchijeve globine. Po SIST EN ISO 7027-1:2017 je to način merjenja prosojnosti oziroma motnosti vode.

Mancinijeva enačba upošteva le najpomembnejše dejavnike odmiranja za izračun koeficienta K . Avtor enačbe poudarja, da izračuni lahko odstopajo od dejanskega stanja, saj niso upoštevani biološki dejavniki, predacija in kompeticija drugih organizmov, sedimentacija bakterij, hidrostatski pritisk in drugi (Mancini, 1978). Z enačbo pa lahko podamo dovolj dobro prvo oceno stanja in umrljivosti koliformnih bakterij v danih pogojih, saj so za 93 % zmanjšanja števila bakterij odgovorni prav upoštevani dejavniki (Chan, 2010; Mancini, 1978; Rozen in Belkin, 2001).

2.3 Obnašanje bakterije *E. Coli* v morskem okolju

Celice bakterije *E. coli* so načeloma nevtravno plovne in same ne tonejo v sediment. Del bakterij pa se ob vstopu v morsko okolje veže na suspendirane trdne delce (SS) v vodi in tako postanejo negativno plovne. Ločimo tri tipe bakterije: nevtravno plovne nepričvrščene bakterije (ECF), negativno plovne bakterije (ECA) na delcih suspendirane snovi ter bakterije, ki so že potonile v sediment (ECS) (Outtara et al., 2013).

2.3.1 ECF

Od vseh bakterij je ECF najmanj in so hkrati tudi najbolj ranljive. Zaradi nevtralne plovnosti – sedimentacija je namreč zanemarljiva zaradi premera bakterije $< 1 \mu\text{m}$ (Thupaki et al., 2013) – ostanejo v višjih plasteh vode, kjer nanje močnejše vpliva sončno sevanje, ki ima v morskem okolju največji vpliv na odmiranje, vplivata pa tudi višja temperatura ter predacija drugih organizmov (Outtara et al., 2013). Nevtravno plovnost v modelu dosežemo tako, da gostoto bakterij ρ_{ECF} izenačimo z gostoto morske vode ρ_{vode} .

2.3.2 ECA

Bakterije, pričvrščene na suspendiranih trdnih delcih (ECA), so v vodnem okolju pogostejše od ECF. Kolonije *E. coli* se lahko vežejo na različno velike delce, a prevladujejo delci drobne zrnavosti, glina ($d < 2 \mu\text{m}$) in melj ($d = 2\text{--}60 \mu\text{m}$).

Pri ECA je koeficient K nižji kot pri ECF, in to zaradi zaščite, ki jim jo nudi delec tako pred UV-svetlobo kot pred protozoi, ki se z bakterijo *E. coli* hranijo (Outtara et al., 2013).

Na hitrost sedimentacije vpliva predvsem velikost delca, na katerega je bakterija pričvrščena, zato je ta različna glede na sestavo SS na obravnavani lokaciji. Neposrednih meritev posedanja SS v Koprskem zalivu ni bilo mogoče pridobiti, zato smo pri simulacijah privzeli, da se bakterije pričvrstijo na manjši delec melja, ki je značilen za suspendirano snov v tem delu zaliva (Malačič et al., 2009; Soczka Mandac, 2013). Vzgon ECA je bil določen po enačbi:

$$vzgon_{ECA} = \frac{\rho_{vode} - \rho_{ECA}}{\rho_{vode}} \quad (4)$$

2.3.3 ECS

Največji delež vseh bakterij je v sedimentu. Potrjeno je, da je sediment v morskem ali celinskem vodnem okolju rezervoar za bakterije, ki so indikator fekalnega onesnaženja (Davies et al., 1995; Roper in Marshall, 1979; Desmarais et al., 2002). Bakterije lahko preživijo v sedimentu tudi več kot eno leto. Sediment je okolje z veliko hranili, relativno malo plenilci, malo svetlobe in je v splošnem bakterijam dovolj prijazno, da se lahko celo množijo (Davies et al., 1995; Roper in Marshall, 1979; Desmarais et al., 2002). Glede na te ugotovitve lahko pri krajših eksperimentih predpostavimo, da se količina bakterij v sedimentu ne spreminja.

V simulacijah sedimenta in sedimentiranih bakterij nismo upoštevali neposredno. Definijsko območje modela namreč zajema le vodni segment, ne pa tudi sedimenta (dna). Zaradi te omejitve modela smo v skladu z navedbami iz literature, ki predpostavljajo minimalno zmanjšanje števila bakterij v sedimentu in pridnenem sloju vode debeline 1 m (Davies et al., 1995; Roper in Marshall, 1979; Desmarais et al., 2002), koeficient umrljivosti K_{ECS} decimiralni.

$$K_{ECS} = \frac{K_{osnovni}}{10}, \quad (5)$$

kjer je $K_{osnovni}$ koeficient, določen po enačbi (2) za izbrano lokacijo. S tem smo dopustili odmiranje v znatno manjši meri kot v višje ležečem vodnem stolpcu, vendar pa je sloj debelejši in zato odmiranje ni ustavljeno.

Žive bakterije iz sedimenta lahko preidejo v suspenzijo zaradi strižnih napetosti ob dnu in tako povzročijo znatno onesnaženje vode. Vzrok za resuspenzijo v morju so predvsem valovi, pa tudi močnejši tokovi in izlivi rek, zato je ta največja ob obalah, kjer je tudi najbolj nevarna, saj lahko bakterije hitreje pridejo v stik s človekom (Eadie et al., 2002).

Advekcija in turbulentna difuzija sta ob dnu zaliva majhni, zato se delci iz sloja ob dnu le redko premaknejo nazaj v vodni stolpec. Dejanskega

resuspendiranja sedimenta in bakterij z obstoječim modelom ne moremo simulirati. Z zmanjšanjem K za 90 % pa lahko simuliramo ugodno okolje, kamor bakterije potonejo in tam obstanejo med simulacijo.

2.3.4 Delež ECA in ECF v polzaprtih zalivih

Delež ECA in ECF je odvisen od številnih dejavnikov in se lahko močno spreminja. Na količino bakterij, ki se bodo pričvrstile na suspendirano snov, vplivajo gram negativna/pozitivna narava bakterije, pH, ionska moč, slanost vode in lastnosti suspendiranega sedimenta (Gruber et al., 2005; Li in McLandsborough, 1999; Lytle et al., 1999). Na količino ECA vpliva tudi razpoložljivi prostor za pričvrstitev – če je SS zasičen s pričvrščenimi bakterijami, se delež ECA zmanjša. Večji delež ECA je nelinearno povezan tudi s prisotnostjo organskih gnojil (Gruber et al., 2005).

V polzaprtih morskih zalivih z iztokom reke, kakršen je Koprski, se lahko ravnamo po virih (Thupaki et al., 2013 in Zhongfu et al., 2012), ki navajajo, da je delež ECF od 0 do 25 % vseh še nesedimentiranih bakterij, ECA pa od 100 do 75 %. V drugih študijah (Auer in Niehaus, 1993; Sinton 2005; Hipsey et al., 2006) je delež ECA med 80 in 100 %. V raziskavi smo privzeli razmerje 1 : 4 (20 % ECF in 80 % ECA), saj merjeni ali izračunani podatki za Koprski zaliv niso na voljo.

2.4 Modeli

2.4.1 Modifikacija modela Nafta3D

Nafta3D je tridimenzionalni transportno-disperzijski in biokemijski model, v osnovi namenjen simulacijam procesov razlitja nafte v morju. Je Lagrangeevski model, ki deluje po MSD (Particle Tracking Method, PTM). Podroben opis osnovnega modela in dosedanjih modifikacij je podan v številnih virih (npr. Širca, 1992; Žagar, 1994; Galuf, 2005; Žagar in Četina, 2011; Žagar et al., 2012; Šoško, 2012; Ostanek Jurina et al., 2014), teoretično ozadje modela pa tudi v

Betancourt et al. (2005), Lehr et al. (2002) in Reed et al. (1999).

Vse enačbe transporta in disperzije v modificiranem modelu so enake, kot je opisano v Žagar in Četina (2011). Razlika je v tem, da ne uporabimo vgrajenega modela turbulence, ki se pri podobnih simulacijah ni izkazal kot uporaben, in zato uporabimo konstantno vrednost vertikalnega koeficienta turbulentne difuzije (Terzić, 2015), kjer upoštevamo še vpliv vzgona (Žagar in Četina, 2011).

Model smo raziskavi prilagodili tako, da izpiše še lokacijo delcev po celicah računske domene. Druge modifikacije niso bile potrebne, saj transport bakterij modeliramo na enak način kot transport naftnega madeža. Upoštevamo, da so delci med seboj neodvisni, z dvema različnima vzgonoma, ki sta različna za ECF in ECA, kot je opisano v poglavju 2.3.

2.4.2 Model odmiranja bakterij *E. coli*

Glavna novost izvedene raziskave je novi model, ki iz podatkov o lokaciji delcev s 3D-matrikami predhodno izračunanega koeficienta umrljivosti K izračuna aktivnost vsakega delca v računski domeni v vsakem časovnem koraku, hkrati pa beleži tudi starost delcev od vstopa v računsko domeno. Model iz matrik koeficienta umrljivosti K (izračunanih po en. 2) vsaki računski celici priredi hitrost zmanjševanja aktivnosti bakterij po razpadni enačbi prvega reda (en. 1) glede na okoljske dejavnike v celici. Ker se lokacija delca tekom simulacije spreminja, ima lahko isti delec v različnih časih simulacije različno hitrost odmiranja.

Rezultate zapišemo v treh oblikah – v matriki aktivnosti delcev, izraženih v odstotkih prvotne aktivnosti, v matriki starosti delcev, iz katere lahko razberemo, kdaj delec vstopi v računsko domeno in koliko je star ob določenem času simulacije ter v datoteki, kjer je po kronološko urejenih vrsticah za vsak delec v vsakem časovnem koraku zapisana lokacija, aktivnost in starost.

2.5 Podatki

48-urna simulacija transporta in odmiranja bakterije je bila izvedena v delu Koprskega zaliva s pričetkom dne 14. 6. 2013 ob 0:00 in koncem 16. 6. 2013 ob 0:00. Izbrano območje simulacij je omejeno z Debelim rtičem na severu in z rtičem Petelin na jugu. Znotraj območja ležijo tri slovenska obalna mesta – Koper, Izola in Ankaran – ter edino slovensko mednarodno tovorno pristanišče – Luka Koper. V Koprski zaliv se izlivata reki Badaševica in Rižana, prva v zaliv Semedela, druga pa v drugi bazen Luke Koper (Tankerska Luka). Obravnavani del Koprskega zaliva smo v horizontalni ravnini razdelili na 159×184 kvadratnih celic s stranico 40 m. V vertikalni ravnini smo uporabili 22 slojev debeline 1 m.

Pri računu smo upoštevali vsiljevanja, ki vplivajo na cirkulacijo v računskem območju in s tem na transport bakterij. Veter je bil izmerjen na Kapitaniji v Koprju, povprečna hitrost in smer znašata 2,08 m/s 216,63° (Osebna komunikacija Anja Fettich, ARSO, 8. 12. 2016). Ostali podatki so bili izmerjeni 14. 6. 2013 na terenu in interpolirani iz opravljenih meritev v zalivu (Soczka Mandac, 2013). Opis postopka odvzemanja vzorcev in prostorske interpolacije z metodo DIVA v horizontalni ravnini za celotno računsko območje je opisan v Soczka Mandac (2013). Slanost in temperatura v računski domeni sta prikazani v preglednici 1.

Upoštevali smo povprečna letna pretoka Rižane (4,6 m³/s) in Badaševice (Ogorelec et al., 1987), izmerjena na postajah Kubed in Šalara.

Horizontalni in vertikalni koeficient turbulentne difuzije znašata $D_h = 2$ m²/s ali 0,5 m²/s in $D_v = 10^{-3}$ m²/s. Oba horizontalna koeficienta sta izbrana glede na izkustveno določena koeficienta za celoten severni Jadran (> 5 m²/s) (Rajar in Četina, 1997) in za Tržaški zaliv (5 m²/s) (Rajar et al., 1998). Logične vrednosti za Koprski zaliv so tako manjše od tistih v Tržaškem (5 m²/s). Kot del občutljivostne analize modela smo zato izvedli simulacije z dvema horizontalnima koeficientoma turbulentne difuzije. D_v je krajevno in časovno nespremenljiv ter sledi vrednosti, določeni v

podobnih meteorološko-oceanografskih razmerah (Terzič, 2015).

Izračunano hitrostno polje v površinskem sloju, ki je bilo uporabljeno pri simulacijah transporta, je prikazano na sliki 2. Podrobneje je cirkulacija prikazana v Lešek (2018).

Kot tipični sediment, na katerega delce se pričvrstijo bakterije (ECA), smo privzeli fin melj ($d = 2 \mu\text{m}$, $\rho_{\text{ECA}} = 1400 \text{ kg/m}^3$), saj takšni delci predstavljajo večinski delež v strukturi sedimenta na obravnavanem območju (Wang et al., 2007; Malačič et al., 2009). Vzgon (preglednica 2) smo izračunali po enačbi 4.

Delce ECA in ECF smo v izbranem razmerju (80 % ECA in 20 % ECF) pri obeh modelih v računsko območje izpustili na dva načina – hipno in kontinuirno. Hipni izpust delcev predstavlja nenadni izpust velike količine bakterij iz točkovnega izvora. Na ta način določamo domet (lokacijo) in aktivnost delcev v izbranem času v določenih tokovnih razmerah. Kontinuirni izpust izbranega števila delcev v vsakem časovnem koraku je bolj podoben dejanskemu iztoku bakterij iz izvora (npr. reke, na kateri stoji čistilna naprava), s katerim pridobimo dinamiko gibanja delcev. Na ta način poleg lokacije in aktivnosti določamo še starost delca, povprečno hitrost potovanja različno starih delcev v različnih slojih vode in druge količine.

Vhodni podatki o izpustih so prikazani v preglednici 2.

Specifične vhodne podatke za model odmiranja bakterij *E. coli* (preglednica 3) smo uporabili za izračun matrik koeficienta umrljivosti K , ki smo ga izračunali za vsako celico po celotni računski domeni in upoštevali znižanje K v pridnenem sloju po enačbi (5). Privzeli smo nespremenljivo vrednost K v celotni računski celici.

Povprečno dnevno osončenost I_A smo odčitali iz meteoroloških letopisov. Podatki o urni vrednosti direktnega in difuznega osončenja so za mesto Koper, ki je najbližje računskemu območju (Meteorološki in ekološki podatki za Koper, 2017).

Če imamo na voljo podatke o urni osončenosti, je I_A povprečje urnih osončenosti:

$$I_A = \frac{1}{24} \sum_{h=1}^{24} I_h \quad (6)$$

Preglednica 1: Podatki o povprečni temperaturi in slanosti morja za vse sloje dne 14. 6. 2013.

Table 1: Data on average sea temperature and salinity for all layers on 14 June 2013.

Sloj	Povprečna temperatura T [°C]	Povprečna slanost S [psu]
0–1 m	22,59	34,92
1–2 m	22,54	35,07
2–3 m	22,02	35,33
3–4 m	21,19	35,93
4–5 m	20,69	36,17
5–6 m	20,29	36,26
6–7 m	19,9	36,39
7–8 m	19,64	36,47
8–9 m	19,18	36,53
9–10 m	18,76	36,66
10–11 m	18,46	36,81
11–12 m	18,21	36,85
12–13 m	17,94	36,91
13–14 m	17,59	36,91
14–15 m	17,24	37,01
15–16 m	17,04	37,04
16–17 m	17,09	37,04
17–18 m	17,09	37,04
18–19 m	17,08	37,03
19–20 m	17,03	36,99
20–21 m	17	36,95

Podatke o Secchijevi globini smo pridobili iz rezultatov meritev podjetja Harpha Sea (Jarc, 2014). Meritve Secchijeve globine so bile izvedene na treh mestih s koordinatami A (13,7002 E; 45,5582 N), B (13,7282 E; 45,5588 N) in C (13,7438 E; 45,5586 N) v Tržaškem zalivu – dve

meritvi sta bili izvedeni v plitvejši, ena pa v globlji vodi na odprtem morju dne 23. 1., 21. 3., 25. 4. in 14. 6. 2013 (Jarc, 2014). Prostorska in časovna spremenljivost parametra zaradi majhnega števila razpoložljivih meritev nista bili upoštevani.

Koeficient pojemanja svetlobe k_e smo izračunali po enačbi (3). Ker pri slednji nimamo merjenega podatka za empirični koeficient a za Koprski zaliv, smo določili srednjo vrednost predpisanega intervala (1,7–1,9) – 1,8. Izračunani koeficient k_e je enak $0,71 \text{ m}^{-1}$ (preglednica 3).

Preglednica 2: Vhodni podatki izpusta.

Table 2: Release input data.

	Hipni izpust	Kontinuirni izpust
Število ECA	1200	1200
Število ECF	300	300
Skupaj	1500	1500
Vzgon ECA	-0,38	-0,38
Vzgon ECF	0	0
Končni čas izpusta [h]	0	5



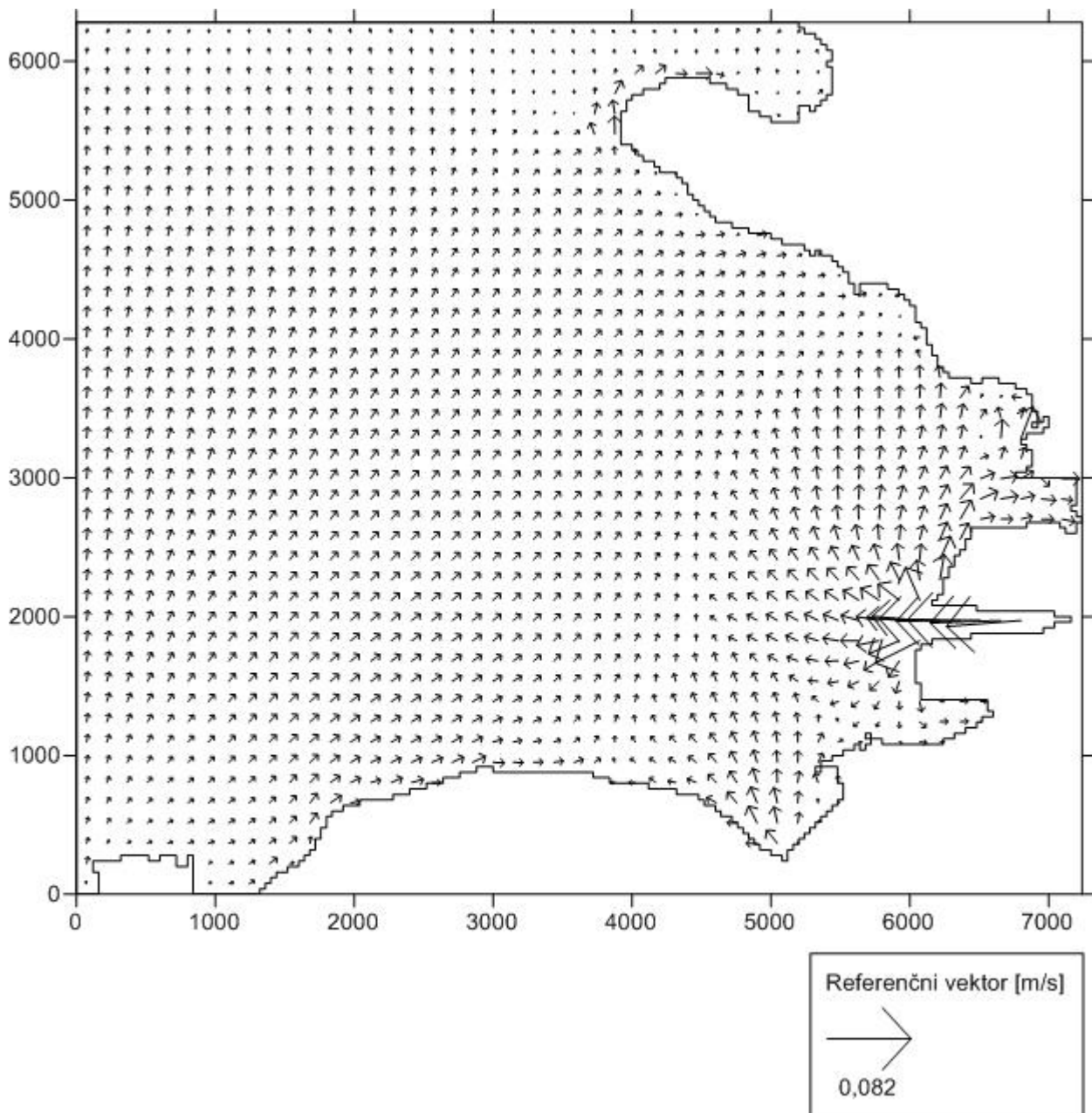
Slika 1: Prikaz računskega območja s kopalnimi vodami in školjčišči.

Figure 1: Computational domain with bathing waters and sites with mariculture.

Preglednica 3: Vhodni podatki za model odmiranja *E. coli*

Table 3: Input data for the *E. coli* deceasing model

Povprečna intenzivnost sončnega sevanja na gladini	I_A	29	ly/h
Empirični koeficient	a	1,8	med 1,7 in 1,9
Secchijeva globina	Z_{Secchi}	2,54	m
Koeficient pojemanja svetlobe z globino	k_e	0,71	m^{-1}



Slika 2: Tokovi v času simulacije: hitrostno polje v površinskem sloju (0–1 m).

Picture 2: Circulation at the time of simulation: velocity field in the top layer (0–1 m).

3. Rezultati

3.1 Rezultati računa koeficienta umrljivosti K

V preglednici 4 so prikazane vrednosti koeficienta umrljivosti po notranjih slojih (brez sloja ob dnu). Koeficient je pričakovano največji ($26,1 \text{ d}^{-1}$) v zgornjem sloju zaradi vpliva sončnega sevanja. Na polovico se zmanjša že na globini 4 m ($12,4 \text{ d}^{-1}$), nato pa se do globine 22 m zmanjša na vrednost 3 d^{-1} .

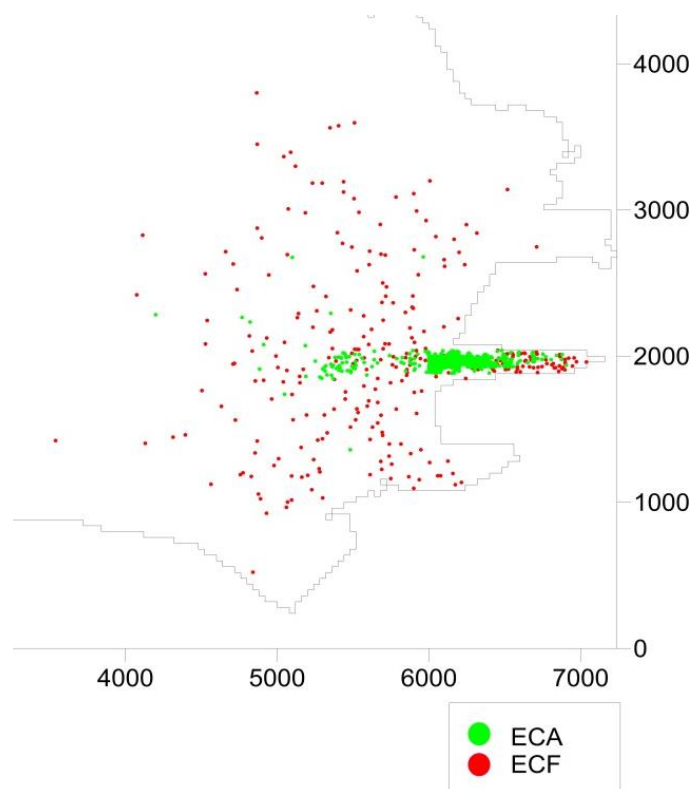
Do globine 10 m je v posameznem sloju le okoli 1 % pridnenih celic, v globljih slojih pa postanejo številnejše. Vrednosti koeficienta K se v celicah posameznega notranjega oz. pridnenega sloja razlikujejo šele na drugi decimalki, zato v preglednici 4 podajamo le povprečno vrednost koeficienta umrljivosti za posamezni sloj.

3.2 Lokacije delcev pri 48-urni simulaciji hipnega izpusta z $D_H = 2 \text{ m}^2/\text{s}$

Na sliki 3 prikazujemo razpršenost 1200 ECA (zelene) in 300 ECF (rdeče) po 48-urni simulaciji s hipnim izpustom. ECA večinoma ostanejo znotraj drugega bazena Luke Koper, ECF pa se pahljačasto razporedijo po večjem delu Koprškega zaliva.

Lokacijo težišča oblaka delcev obeh tipov v nekaj značilnih časih prikazujemo v preglednici 5. Premik je največji v prvih 10 h, ko se delci še nahajajo na območju vpliva (gibalne količine) vtoka Rižane.

Premik v y-smeri je minimalen, saj je vtok Rižane usmerjen točno proti zahodu. V horizontalni ravnini se težišče ECF premika okrog 30 % hitreje od ECA (slika 3). Slednje pa tonejo znatno hitreje in globlje od ECF zaradi predpisane večje gostote delcev. Po 10 h je velika večina ECA v pridnenem sloju, oddaljena povprečno okrog 0,6 m od dna, medtem ko ECF ostanejo na globini med 5 in 6 m (slika 4).



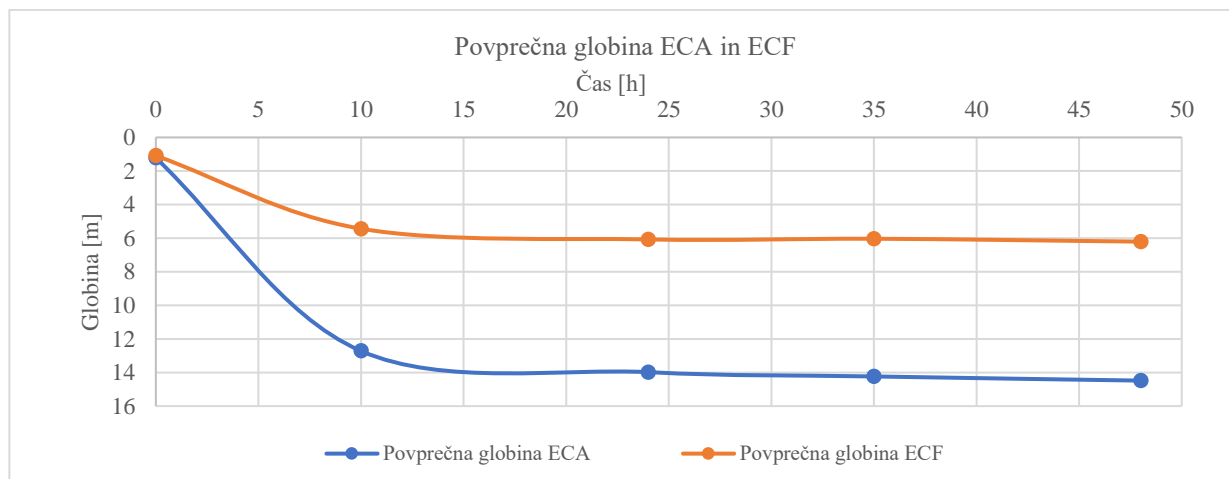
Slika 3: Lokacije ECA in ECF po 48 h simulacije – hipni izpust, $D_H = 2 \text{ m}^2/\text{s}$.

Figure 3: ECA and ECF location after 48 h of simulation – instantaneous release, $D_H = 2 \text{ m}^2/\text{s}$.

Preglednica 4: Minimalna, maksimalna in povprečna vrednosti koeficienta umrljivosti K za notranje sloje (brez pridnenega sloja) ter odstotek celic in povprečna vrednost K v pridnenem sloju.

Table 4: Minimum, maximum, and average values of the decease coefficient K for the inner layers (without the bottom layer), percentage of cells and their average K in the bottom layer.

Globina [m]	K_{min-in} [dan^{-1}]	K_{max-in} [dan^{-1}]	\bar{K}_{in} [dan^{-1}]	% celic (ob dnu)	\bar{K}_{bot} [dan^{-1}]
0–1	25,99	26,17	26,1	1,33	2,61
1–2	19,39	19,59	19,54	1,53	1,95
2–3	15,05	15,3	15,21	1,43	1,52
3–4	12,13	12,39	12,27	1,60	1,22
4–5	10,11	10,33	10,22	1,51	1,02
5–6	8,66	8,88	8,76	1,48	0,87
6–7	7,58	7,79	7,66	1,29	0,76
7–8	6,75	6,94	6,84	1,38	0,68
8–9	6,12	6,29	6,17	1,15	0,61
9–10	5,57	5,76	5,63	1,27	0,56
10–11	5,16	5,33	5,2	1,66	0,52
11–12	4,81	4,91	4,84	2,15	0,48
12–13	4,51	4,57	4,53	2,64	0,45
13–14	4,22	4,28	4,26	3,22	0,43
14–15	3,91	4,05	4,03	4,16	0,40
15–16	3,7	3,85	3,83	5,29	0,38
16–17	3,65	3,68	3,67	7,31	0,37
17–18	3,51	3,54	3,53	13,56	0,35
18–19	3,38	3,41	3,4	35,64	0,34
19–20	3,27	3,3	3,28	27,72	0,33
20–21	3,17	3,2	3,18	41,77	0,32
21–22	3,08	3,1	3,08	84,03	0,31
22–23	2,99	3,02	3	100,00	0,30



Slika 4: Globina težišča ECA in ECF pri hipnem izpustu.

Figure 4: Depth of the ECA and and the ECF gravity centre in instantaneous release.

Preglednica 5: Premik težišča delcev in razpršenost ECA in ECF okoli težišča pri hipnem izpustu ($D_H = 2 \text{ m}^2/\text{s}$), kjer so x , y in z koordinate težišča delcev, xy premik težišča v horizontalni ravnini, ODD oddaljenost od dna, $\sigma_x/y/z/xy/ODD$ predstavlja standardno deviacijo (razpršenost) posameznega parametra.

Table 5: Gravity-centre shift of the particles and the dispersion of the ECA and ECF around the gravity center in instantaneous release ($D_H = 2 \text{ m}^2/\text{s}$), where x , y , and z are the coordinates of the gravity centre, xy represents the displacement in the horizontal plane, ODD is the distance from the bottom, and the $\sigma_x / y / z / xy / ODD$ represents the standard deviation (dispersion) of the individual parameter.

ECA	x	σ_x	y	σ_y	xy	σ_{xy}	z	σ_z	ODD	σ_{ODD}
10 h	591,57	229,42	1,28	32,37	591,57	223,49	13,34	1,02	0,61	0,53
24 h	884,93	251,11	12,31	30,83	885,02	241,98	14,36	1,1	0,61	0,54
35 h	980,31	225,01	13,04	43,72	980,4	214,47	14,7	0,97	0,59	0,52
48 h	1028,81	233,31	15,01	48,79	1028,92	220,38	14,83	0,86	0,58	0,48
ECF	x	σ_x	y	σ_y	xy	σ_{xy}	z	σ_z	ODD	σ_{ODD}
10 h	805,09	414,02	1,33	131,81	805,09	390,77	4,11	3,72	7,36	4,10
24 h	1048,71	528,87	21,85	322,28	1048,94	512,15	5,04	3,91	6,82	4,25
35 h	1227,14	571,92	23,68	454,08	1227,37	553,38	5,55	4,27	6,83	4,45
48 h	1377,06	666,52	20,19	551,04	1377,21	654,56	5,42	4,2	5,39	3,94

3.3 Lokacije delcev pri 48-urni simulaciji kontinuirnega izpusta z $D_H = 2 \text{ m}^2/\text{s}$

Horizontalna razporeditev in razpršenost delcev je pri kontinuirnem izpustu krajšega trajanja zelo podobna kot pri hipnem izpustu, saj turbulentna difuzija kmalu po koncu izpusta izniči razlike (Lešek, 2018). Preglednica 6 in slika 5 prikazujeta

lokacije težišča ECF in ECA pri kontinuirnem izpustu.

3.4 Lokacije delcev pri 48-urni simulaciji hipnega izpusta z $D_H = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$

Primerjava slik 3 in 5 pokaže spremembo raztrosa predvsem pri ECF, kar potrjuje tudi primerjava

raztrosa – standardnih deviacij v preglednicah 6 in 7.

Povprečna globina ECA je pri $D_H = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ za približno 2 m manjša kot pri $D_H = 2 \text{ m}^2/\text{s}$ (sliki 4 in 6 ter preglednici 6 in 7), vseeno pa delci v povprečju potonejo v spodnji sloj vode. Vzrok za razliko v povprečni globini delcev je batimetrija zaliva, ki se z oddaljevanjem od obale postopoma pogloblja. ECA se pri $D_H = 2 \text{ m}^2/\text{s}$ pomaknejo dlje od izvora, kjer je pridneni sloj na večji globini. Ne glede na vrednost D_H večina delcev tone v prvih 10 urah simulacije, nato pa ostane na približno enaki globini do konca simulacije. Težišče ECA je bolj stabilno od težišča ECF, med simulacijo je od dna oddaljeno med 6,5 in 6,8 m (preglednica 7).

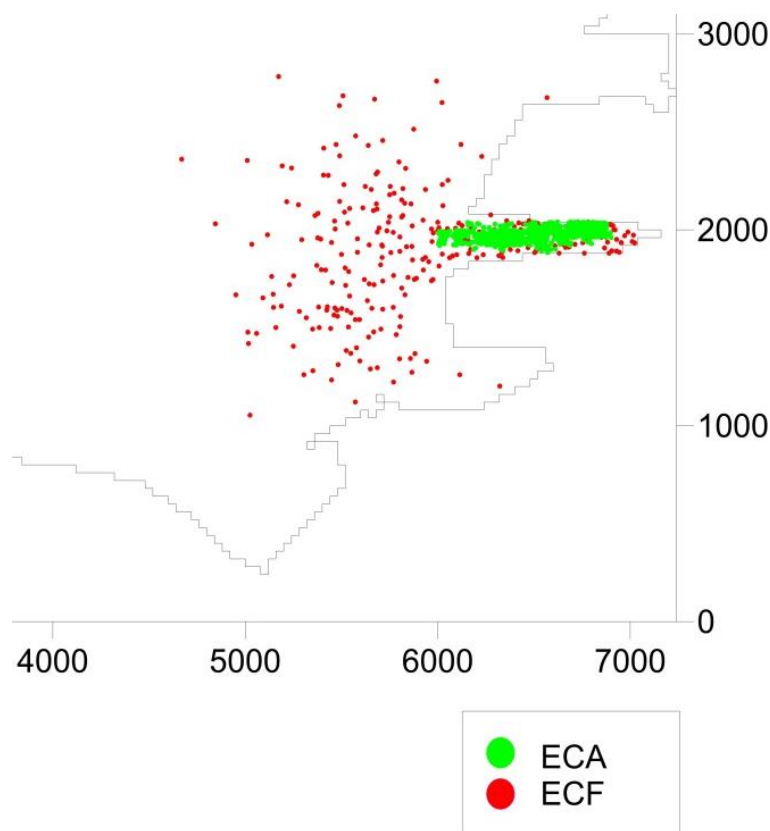
3.5 Primerjava med hipnim in kontinuirnim izpustom v prvih 12 urah, $D_H = 2 \text{ m}^2/\text{s}$

Po 48 urah so razlike med hipnim in kratkim kontinuiranim izpustom minimalne, zato

podrobneje prikazujemo še rezultate prvih 12 ur simulacije. V preglednicah 8 in 9 so zapisani rezultati v intervalu 1 h za vsako uro simulacije do dvanajste, pri čemer smo razlike δx_i računali kot

$$\delta x_i = x_{i \text{ kont}} - x_{i \text{ hipni}} \quad (7)$$

za posamezne smeri koordinatnega sistema. Po pričakovanih prvih nekaj ur razlika v prepotovani razdalji delcev narašča, po koncu kontinuirnega izpusta pa začne upadati in je po 12 urah že zanemarljivo majhna. Razpršenost (standardna deviacija) ima nekoliko bolj naključen vzorec, ki pa se v splošnem ravna po istem pravilu. Pri ECF (preglednica 9), ki tonejo počasneje, ima difuzija v vertikalni smeri večji vpliv zaradi predpisane nevtralne plovnosti, delci pa so porazdeljeni po večjem delu vodnega stolpca. Razlika v globini težišča in razpršenost sta zato znatno večji kot pri ECA.



Slika 5: Lokacije ECA in ECF po 48 h simulacije – kontinuirni izpust, $D_H = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$.

Figure 5: ECA and ECF location after 48 h of simulation – continuous release, $D_H = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$.

Preglednica 6: Premik težišča delcev in razpršenost ECA in ECF okoli težišča pri kontinuirnem izpustu ($D_H = 2 \text{ m}^2/\text{s}$), kjer so x , y in z koordinate težišča delcev, xy premik težišča v horizontalni ravnini, ODD oddaljenost od dna, $\sigma_x/y/z/xy/ODD$ predstavlja standardno deviacijo (razpršenost) posameznega parametra.

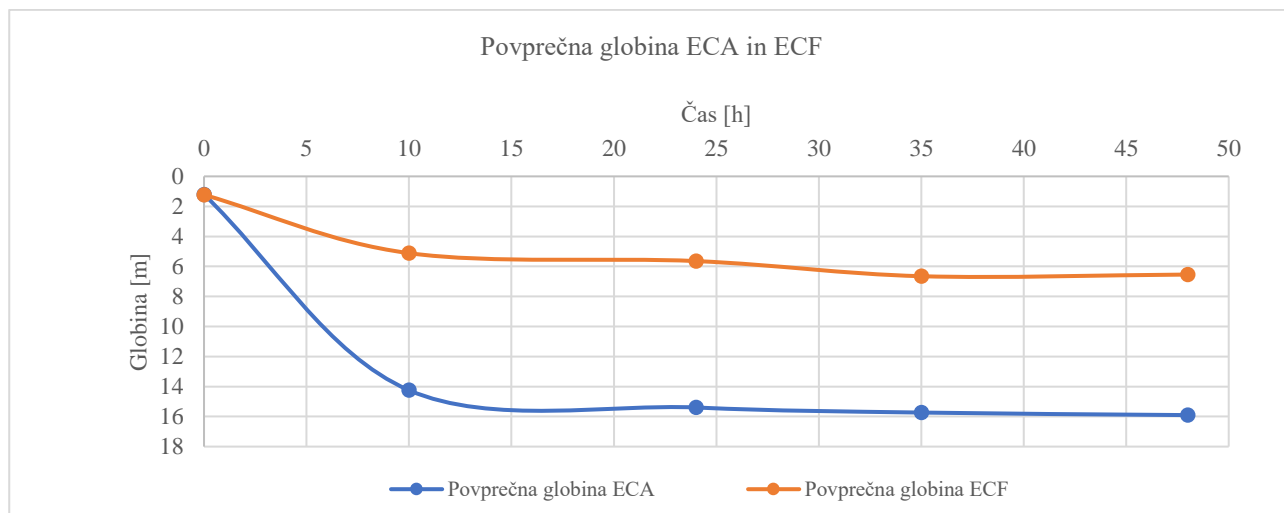
Table 6: Gravity-centre shift of the particles and the dispersion of the ECA and ECF around the gravity center during continuous release ($D_H = 2 \text{ m}^2/\text{s}$), where x , y , and z are the coordinates of the gravity centre, xy represents the displacement in the horizontal plane, ODD is the distance from the bottom, and the $\sigma_x / y / z / xy / ODD$ represents the standard deviation (dispersion) of the individual parameter.

ECA	x	σ_x	y	σ_y	xy	σ_{xy}	z	σ_z	ODD	σ_{ODD}
10 h	534,02	192,57	1,74	32,47	534,02	4,71	13,14	1,01	0,61	0,55
24 h	856,18	265,95	10,51	30,21	856,24	6,39	14,3	1,14	0,59	1,06
35 h	965,98	227,29	14,23	31,51	966,08	5,45	14,63	0,97	0,6	0,53
48 h	1029,81	234,76	14,58	60,76	1029,92	5,45	14,8	0,84	0,59	0,71
ECF	x	σ_x	y	σ_y	xy	σ_{xy}	z	σ_z	ODD	σ_{ODD}
10 h	674,28	366,03	16,2	106,37	674,48	8,77	4,01	3,8	7,28	3,47
24 h	1047,61	517,76	17,66	305,41	1047,76	12,83	4,54	3,97	7,42	3,27
35 h	1251,24	602,33	13,08	398,66	1251,3	14,88	5,55	4,2	6,62	3,18
48 h	1379,47	674,96	1,48	487,73	1379,48	16,49	5,44	4,26	7,03	3,12

Preglednica 7: Premik težišča delcev in razpršenost ECA in ECF okoli težišča pri hipnem izpustu ($D_H = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$), kjer so x , y in z koordinate težišča delcev, xy premik težišča v horizontalni ravnini, ODD oddaljenost od dna, $\sigma_x/y/z/xy/ODD$ predstavlja standardno deviacijo (razpršenost) posameznega parametra.

Table 7: The gravity-centre shift of the particles and the dispersion of the ECA and ECF around the gravity center in instantaneous release ($D_H = 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$), where x , y , and z are the coordinates of the gravity centre, xy represents the displacement in the horizontal plane, ODD is the distance from the bottom, and the $\sigma_x / y / z / xy / ODD$ represents the standard deviation (dispersion) of the individual parameter.

ECA	x	σ_x	y	σ_y	xy	σ_{xy}	z	σ_z	ODD	σ_{ODD}
10 h	325,29	113,8	12,99	25,31	325,54	108,36	11,62	2,2	0,6	0,55
24 h	448,58	131,62	10,64	29,37	448,71	129,47	12,88	0,96	0,57	0,49
35 h	512,79	184,01	4,71	31,5	512,81	180,30	13,13	0,96	0,58	0,52
48 h	586,81	225,57	2,03	32,2	586,81	220,26	13,38	1,01	0,6	0,48
ECF	x	σ_x	y	σ_y	xy	σ_{xy}	z	σ_z	ODD	σ_{ODD}
10 h	733,16	381,65	21,96	84,93	733,49	366,17	4,34	3,68	6,79	4,42
24 h	930,39	486,08	51,35	172,23	931,81	478,49	4,97	4,03	6,49	4,39
35 h	1038,88	530,05	62,52	222,77	1040,76	523,34	4,93	4,18	6,87	4,63
48 h	1159,38	529,74	74,83	287,37	1161,8	525,81	5,11	4,26	6,8	4,32



Slika 6: Globina težišča ECA in ECF pri kontinuirnem izpustu.

Figure 6: Depth of the ECA and the ECF gravity centre in continuous release.

Preglednica 8: Razlika v premiku težišča, oddaljenosti od dna in razpršenosti oblaka delcev ECA pri hipnem in kontinuirnem izpustu za prvih 12 ur simulacije.

Table 8: The difference in the gravity-center shift, distance from the bottom, and in dispersion of the ECA particle cloud in instantaneous and continuous releases for the first 12 hours of simulation.

ECA	Razlika v premiku težišča med izpustoma [m]			Razlika v premiku težišča v ravnini [m]	Razlika v oddaljenosti od dna [m]	Razlika v razpršenosti med izpustoma [m]		
	Δx	Δy	Δz			Δxy	Δz	σx
Čas								
1 h	56,78	5,92	2,85	57,04	-0,33	-2,28	1,62	-0,48
2 h	107,99	-4,23	4,65	107,87	-1,12	-17,14	2,65	-1,4
3 h	138,71	9,62	4,58	138,88	-1,15	-36,19	0,71	-2,81
4 h	147,29	10,32	3,89	147,47	-0,91	-41,82	0,9	-3,38
5 h	136,81	6,43	3,09	136,91	-0,71	-31,99	1,76	-3,25
6 h	96,69	0,66	1,32	96,68	-0,31	4,25	0,72	-1,53
7 h	71,08	-6,38	0,49	70,97	-0,06	26,48	1,81	-0,44
8 h	65,13	-5,69	0,3	65,06	-0,05	37,59	1,51	-0,01
9 h	63,02	-4,08	0,19	62,99	0,02	40,12	0,14	0,08
10 h	57,56	-0,46	0,2	57,56	-0,01	36,85	-0,09	0,02
11 h	54,96	1,24	0,18	54,96	0	29,21	-0,43	0,06
12 h	55,54	3,36	0,22	55,55	0	23,59	-0,88	0,07

Preglednica 9: Razlika v premiku težišča, oddaljenosti od dna in razpršenosti oblaka delcev ECF pri hipnem in kontinuirnem izpustu za prvih 12 ur simulacije.

Table 9: The difference in gravity-center shift, distance from the bottom, and in dispersion of the ECF particle cloud in instantaneous and continuous releases for the first 12 hours of simulation.

Čas	Razlika v premiku težišča med izpustoma [m]			Razlika v premiku težišča v ravnini [m]	Razlika v oddaljenosti od dna [m]	Razlika v razpršenosti med izpustoma [m]		
	Δx	Δy	Δz	Δxy	Δz	$\Delta \sigma x$	$\Delta \sigma y$	$\Delta \sigma z$
1 h	94,56	10,16	0,75	94,85	2,62	-2,28	1,62	-0,48
2 h	137,19	3,41	0,68	137,19	2,07	-17,14	2,65	-1,4
3 h	190,27	5	0,84	190,32	1,69	-36,19	0,71	-2,81
4 h	235,89	7,95	1,29	236,03	0,97	-41,82	0,9	-3,38
5 h	254,99	2,19	1,1	254,89	0,4	-31,99	1,76	-3,25
6 h	210,8	-9,04	0,83	210,45	-0,28	4,25	0,72	-1,53
7 h	186,71	-12,19	0,65	186,38	-0,48	26,48	1,81	-0,44
8 h	164,93	-2,05	0,71	164,83	-0,52	37,59	1,51	-0,01
9 h	146,58	-1,69	0,42	146,52	-0,28	40,12	0,14	0,08
10 h	130,81	-14,87	0,09	130,62	0,08	36,85	-0,09	0,02
11 h	100,95	-16,78	0,38	100,7	-0,08	29,21	-0,43	0,06
12 h	78,29	-11,27	0,3	78,16	-0,07	23,59	-0,88	0,07

3.6 Analiza aktivnosti delcev pri hipnem izpustu z $D_H = 2 \text{ m}^2/\text{s}$

ECA in ECF se tekom simulacije nahajajo na različnih globinah (sliki 4 in 6), aktivnost se ECF manjša bistveno hitreje. Obe vrsti bakterij zato obravnavamo ločeno, rezultate pa prikazujemo pri ECA za obdobje 48 h, pri ECF pa zaradi znatno hitrejšega odmiranja le za obdobje 6 h pri hipnem izpustu in 10 h pri kontinuirnem izpustu. Po izbranem času več kot 90 % bakterij doseže aktivnost manjšo od 10 %. V nadaljevanju uporabljamo za čas, ko več kot 90 % bakterij doseže aktivnost manjšo od 10 %, oznako T_{90} .

3.6.1 Aktivnost ECA pri hipnem izpustu

Iz preglednic 10 in 11 je razvidno, da se aktivnost ECA najbolj zmanjša v prvi uri simulacije, ko so najbližje vodni gladini (slika 4), kjer nanje močno

vpliva sončno sevanje. V nadaljnjih štirih urah se aktivnost večine delcev zmanjša na 40–60 %, po 48 h simulacije pa ima le še 10 % delcev aktivnost nad 10 % ($T_{90} = 48 \text{ h}$). Večina ECA v simuliranih pogojih odmre v 48 h in zadnji aktivni delci se nahajajo približno 1 km proč od izvora (preglednica 11). Težišče ECA se že od druge ure simulacije nahaja v sloju tik nad dnem, ki smo mu pripisali manjši koeficient umrljivosti K po enačbi (5), zato se njihova aktivnost zmanjšuje veliko počasneje.

3.6.2 Aktivnost ECF pri hipnem izpustu

Aktivnost ECF (preglednica 12) se predvsem zaradi manjše globine, na kateri se nahajajo (slika 6), manjša znatno hitreje kot aktivnost ECA. Že v prvi uri simulacije se aktivnost večine delcev zmanjša za 40 do 70 %, povprečna aktivnost pa

znaša 45 %. V naslednji uri simulacije se povprečna aktivnost znova razpolovi in znaša 23 %. Po 6 h ima že 93 % delcev aktivnost manjšo od 10 % (povprečna aktivnost 3 %). Čas T_{90} torej znaša približno 6 h.

V preglednici 13 prikazujemo lokacije ECF. Največja razdalja od izpusta še aktivnih ECF po 6 h simulacije je 665 m, njihova povprečna aktivnost pa znaša 3 %.

3.7 Analiza aktivnosti delcev pri kontinuirnem izpustu pri $D_H = 2 \text{ m}^2/\text{s}$

3.7.1 Aktivnost ECA pri kontinuirnem izpustu

Zmanjševanje aktivnosti ECA (preglednica 14) je v primerjavi s hipnim izpustom (preglednica 10) počasnejše zaradi različne starosti delcev. Po 48 h simulacije je v najnižjem razredu aktivnosti približno 13 % delcev manj kot pri hipnem izpustu. Čas T_{90} je pri kontinuirnem izpustu ECA večji od 48 h, zadnji še aktivni delci pa se nahajajo na približno enaki razdalji od izvora kot pri hipnem izpustu (preglednici 11 in 15).

Primerjava preglednic 11 in 15 pokaže, da so tako povprečna kot minimalna in maksimalna aktivnost v vseh časovnih obdobjih računa večje pri kontinuirnem izpustu, največje razlike pa so v času izpusta, in sicer zaradi postopnega dodajanja svežih delcev v računsko območje.

3.7.2 Aktivnost ECF pri kontinuirnem izpustu

Aktivnost ECF pri kontinuirnem izpustu obravnavamo do časa 10 h, saj se do takrat aktivnost več kot 90 % delcev zmanjša pod 10 %.

Razlika v aktivnosti ECF, ki izvira iz značilnosti kontinuirnega izpusta, je »raztros« aktivnosti. V prvi uri simulacije je po približno 15 % delcev v vsakem od razredov med 40 in 100 % aktivnosti (preglednica 16), pri hipnem pa je 40 % delcev v razredu med 40 in 50 % (preglednica 12). V drugi uri simulacije so zastopane vse aktivnosti med 10 in 100 %, največ (20 % delcev) pa je znotraj razreda 30–40 % aktivnosti. V četrti uri simulacije je dobrih 40 % delcev, izpuščenih v prvih korakih, znotraj dveh najnižjih razredov aktivnosti (med 0 in 20 %). Po šestih urah simulacije je aktivnost polovice delcev manjša od 10 %, odstotek pa narašča do desete ure, ko aktivnost nad 90 % delcev upade pod 10 % ($T_{90} = 10 \text{ h}$). Domet zadnjih še aktivnih delcev znaša 676 m (preglednica 17).

Povprečna aktivnost (preglednica 17) pade na polovico po dveh urah simulacije, približno uro kasneje kot pri hipnem izpustu. Po desetih urah simulacije je povprečna aktivnost delcev 2 %, maksimalna pa 23 %.

Preglednica 10: Odstotek ECA v posameznih razredih aktivnosti pri hipnem izpustu.

Table 10: Percentage of ECA in individual activity classes in instantaneous release.

Aktivnost [%]	Čas simulacije / Odstotek delcev v razredu [%]						
	60 s	1 h	5 h	10 h	24 h	35 h	48 h
90–100	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
80–90	0,0	4,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
70–80	0,0	35,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
60–70	0,0	42,3	9,1	0,0	0,0	0,0	0,0
50–60	0,0	15,4	36,3	6,3	0,0	0,0	0,0
40–50	0,0	2,3	38,3	37,3	0,0	0,0	0,0
30–40	0,0	0,0	14,5	43,9	1,7	0,0	0,0
20–30	0,0	0,0	1,7	12,0	53,5	1,0	0,0
10–20	0,0	0,0	0,1	0,4	44,6	83,8	10,6
0–10	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	15,2	89,4

Preglednica 11: Lokacija in aktivnost ECA pri hipnem izpustu.

Table 11: ECA location and activity in instantaneous release.

ECA Čas simulacije	Povpre- čna globina delcev [m]	Oddalje- nost težišča od dna [m]	Premik težišča v ravnini [m]	Minimalna aktivnost [%]	Maksimalna aktivnost [%]	Povprečna aktivnost [%]	Standardna deviacija [%]	% delcev z aktivnostjo > 10 %
60 s	1,22	1,04	5,08	98,21	99,87	99,31	0,74	100
1 h	11,48	2,31	169,16	41,82	86,39	67,43	8,19	100
5 h	15,7	0,62	445,56	12,68	69,29	48,71	8,73	100
10 h	14,44	0,61	591,57	9,79	57,01	38,66	7,3	100
24 h	15,46	0,61	885,02	6,13	38,1	20,77	4,42	100
35 h	15,8	0,59	980,4	3,21	23,81	13,03	2,93	85
48 h	15,93	0,58	1028,92	1,52	13,31	7,6	1,81	11

Preglednica 12: Odstotek ECF v posameznih razredih aktivnosti pri hipnem izpustu.

Table 12: Percentage of ECF in individual activity classes in instantaneous release.

Aktivnost [%]	Čas simulacije / odstotek delcev v razredu [%]				
	60 s	1 h	2 h	4 h	6 h
90–100	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
80–90	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
70–80	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0
60–70	0,0	6,3	0,0	0,0	0,0
50–60	0,0	19,0	1,0	0,0	0,0
40–50	0,0	43,0	6,0	0,0	0,0
30–40	0,0	31,3	12,0	2,0	0,0
20–30	0,0	0,0	32,0	4,0	1,0
10–20	0,0	0,0	49,0	18,0	6,0
0–10	0,0	0,0	0,0	76,0	93,0

Preglednica 13: Lokacija in aktivnost ECF pri hipnem izpustu.

Table 13: ECF location and activity in instantaneous release.

ECF	Povprečna globina delcev [m]	Oddaljenost težišča od dna [m]	Premik težišča v ravlini [m]	Min. aktivnost [%]	Maks. aktivnost [%]	Povprečna aktivnost [%]	Standardna dev.	% delcev z akt. > 10 %
Čas simulacije								
60 s	1,1	1,18	4,86	98,21	99,87	99,14	0,8	100
1 h	1,91	8,3	241,89	34,01	71,58	45,51	8,41	100
2 h	2,63	9,01	361,47	11,97	52,98	23,03	8,94	100
4 h	3,7	8,88	553,75	1,65	39,38	7,74	6,68	24
6 h	4,21	8,4	665,18	0,21	23,7	3,23	4,08	7

Preglednica 14: Odstotek ECA v posameznih razredih aktivnosti pri kontinuirnem izpustu.

Table 14: Percentage of ECA in individual activity classes in continuous release.

Aktivnost [%]	Čas simulacije						
	60 s	1 h	5 h	10 h	24 h	35 h	48 h
90–100	100	21,7	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0
80–90	0,0	27,1	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0
70–80	0,0	32,9	11,9	0,0	0,0	0,0	0,0
60–70	0,0	12,1	23,3	2,1	0,0	0,0	0,0
50–60	0,0	5,4	30,0	20,9	0,0	0,0	0,0
40–50	0,0	0,8	16,8	41,4	0,1	0,0	0,0
30–40	0,0	0,0	7,0	26,7	9,4	0,0	0,0
20–30	0,0	0,0	1,0	8,3	63,3	7,0	0,0
10–20	0,0	0,0	0,2	0,7	26,5	82,9	23,8
0–10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	10,1	76,2

Preglednica 15: Lokacija in aktivnost ECA pri kontinuirnem izpustu.

Table 15: ECA particles location and activity in continuous release.

Čas	Povpr. globina delcev [m]	Oddaljen. težišča od dna [m]	Premik tež. v ravnini [m]	Min. akt. [%]	Maks. akt. [%]	Povpr. akt. [%]	Stand. dev.	% delcev z akt. > 10 %
60 s	1,21	1,79	13,61	98,21	99,87	98,85	0,71	100
1 h	4,25	2,64	112,28	47,48	99,87	79,64	11,78	100
5 h	10,82	1,35	303,4	17,86	99,87	59,72	14,93	100
10 h	14,24	0,61	534,02	15,06	66,91	43,11	9,02	100
24 h	15,4	0,59	856,24	7,21	41,32	23,1	5,27	99,3
35 h	15,73	0,6	966,08	4,03	26,97	14,51	3,55	89,9
48 h	15,9	0,59	1029,92	2,34	16,22	8,46	2,2	23,8

Preglednica 16: Odstotek ECF v posameznih razredih aktivnosti pri kontinuirnem izpustu.

Table 16: Percentage of ECF in individual activity classes in continuous release.

Aktivnost [%]	Čas simulacije						
	60 s	1 h	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h
90–100	100	18,3	8,3	3,3	0,0	0,0	0,0
80–90	0,0	13,3	7,5	4,1	0,0	0,0	0,0
70–80	0,0	16,6	5,8	5,4	0,0	0,0	0,0
60–70	0,0	11,6	12,5	5,0	0,0	0,0	0,0
50–60	0,0	23,3	9,1	5,0	1,0	0,0	0,0
40–50	0,0	15,0	14,1	7,9	5,7	0,0	0,0
30–40	0,0	1,6	20,0	11,6	8,3	0,3	0,0
20–30	0,0	0,0	16,6	14,5	13,6	3,0	0,3
10–20	0,0	0,0	5,8	22,5	19,0	12,3	3,0
0–10	0,0	0,0	0,0	20,4	52,3	84,3	96,6

Preglednica 17: Podatki o lokaciji in aktivnosti ECF pri kontinuirnem izpustu.

Table 17: ECF particles location and activity in continuous release.

Čas	Povpr. globina delcev [m]	Oddaljen. težišča od dna [m]	Premik težišča v ravnini [m]	Min. akt. [%]	Maks. akt. [%]	Povpr. akt. [%]	Stand. dev.	% delcev z akt. > 10 %
60 s	1,23	0,77	17,33	99,87	99,87	99,87	0	100
1 h	1,16	5,67	143,84	36,4	99,73	68,87	18,03	100
2 h	1,95	6,95	224,39	15,34	99,73	50,68	23,26	100
4 h	2,41	7,91	318,74	2,04	99,87	32,52	25,85	79,58
6 h	3,38	8,68	453,55	0,28	54,99	14,42	13,2	47,67
8 h	4,5	7,84	579,62	0,03	30,76	5,08	5,54	15,67
10 h	5,11	7,28	676,62	0,01	23,55	2,28	3,12	3,33

4. Razprava

Iz rezultatov simulacije v izbranih meteorološko-oceanografskih razmerah je razvidno, da poleg cirkulacije na transport bakterij najbolj vpliva njihova plovnost. Potrdimo lahko oba dela prve hipoteze: ECA in ECF imata bistveno različen vzorec gibanja, pričvrščenost na suspendirane delce pa je najpomembnejši vzrok za razliko. ECF ostajajo v višjih slojih in se hitreje premikajo z močnejšimi tokovi, ko zapustijo drugi bazen Luke Koper, pa se zaradi advekcije in turbulentne difuzije pahljačasto razporedijo na večjem območju zaliva. ECA kmalu potonejo v pridneni sloj (z nižjim K) in večinoma ostanejo znotraj drugega bazena.

Drugo hipotezo smo potrdili v celoti: razlike v umrljivosti (hitrosti zmanjšanja aktivnosti) med ECA in ECF so bistvene. ECA potonejo v globino, kamor prodre manj svetlobe, ki je najpomembnejši dejavnik odmiranja. V pridnenem sloju, kjer se nahaja večina ECA, smo z znižanjem koeficienta K simulirali pogoje v sedimentu. ECF, ki lebdi višje v vodnem stolpcu, povprečno na približno 6 m globine, se aktivnost manjša približno za velikostni razred hitreje. ECA dosežejo T_{90} po približno 48 h pri hipnem izpustu, pri kontinuirnem pa se čas T_{90} podaljša približno za čas izpusta. Pri hipnem izpustu ECF je T_{90} približno enak 6 h in se, podobno kot pri ECA, pri kontinuirnem podaljša za čas izpusta. Tudi odstotek delcev z aktivnostjo nad 10 % se razlikuje glede na vrsto izpusta in tip delcev, vpliv slednjega pa je značilno večji. Po 10 h je odstotek ECA z aktivnostjo večjo od 10 % pri kontinuirnem izpustu še 100 %, pri hipnem 38,6 %, ECF pri kontinuirnem izpustu 3,3 %, ECF pri hipnem izpustu pa že manj kot 1 %..

5. Zaključek

Izdelali smo model odmiranja *E coli*, kjer z metodo sledenja delcev prikažemo gibanje, z novim modulom pa simuliramo zmanjševanje aktivnosti bakterij. Model smo preizkusili na izbranih meteorološko-oceanografskih podatkih v obdobju 14.–16. 6. 2013. Novo modelno orodje bi bilo treba za simulacije, ki bodo omogočale obravnavo dosega onesnaženja in aktivnosti bakterij pri

potencialnem onesnaženju morja z *E. coli*, nadgraditi in podrobno umeriti. Z modelom bo tako mogoče obravnavati kakovost kopalnih voda in morebitni vpliv na školjčičišča.

Umerjanje modela bo zahtevalo dodatne meritve tokovne slike v različnih cirkulacijskih razmerah, predvsem pa sočasne meritve koncentracij *E. coli* na izpustu in različnih lokacijah v Koprskem zalivu v intervalu približno 48 h, dodatno pa tudi Secchijeve globine, ki smo jo v izvedenih simulacijah povprečili iz majhnega števila (razpoložljivih) podatkov. Z upoštevanjem merjene sedimentacijske hitrosti delcev značilnih velikosti bi bilo mogoče bolj točno določiti čas usedanja in zmanjševanje aktivnosti.

Prikazano različico modela je mogoče dograjevati v več smereh. Najpomembnejši dodatek bi nedvomno predstavljale sočasne simulacije v vodi in sedimentu, z upoštevanjem treh tipov bakterij (ECF, ECA in ECS) ter usedanja v sediment in resuspendiranja zaradi tokov, valov in plovbe. Nadgradnja s še drugimi biološkimi procesi (npr. razmnoževanje, predacija) bi bila mogoča ob boljšem poznavanju bioloških parametrov vzdolž prehranske verige. Pomembno nadgradnjo modela bi predstavljala tudi vgradnja izboljšanih modelov turbulence v model gibanja po metodi sledenja delcev.

Zahvala

Razvoj modela je delno potekal v okviru raziskovalnega programa P2-0180. Avtorja se za posredovane podatke zahvaljujeta Anji Fettich (ARSO), Roku Soczki Mandacu, podjetju Harpha Sea ter Nacionalnemu inštitutu za biologijo – Morski biološki postaji Piran.

Viri

Auer, M. T., Niehaus S. L. (1993). Modeling fecal coliform bacteria. 1: Field and laboratory determination of loss kinetics. *Water Res.* 27: 693–701. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(93\)90179-L](https://doi.org/10.1016/0043-1354(93)90179-L).

Betancourt, F., Palacio, A., Rodriguez, A. (2005). Effects of the mass transfer process in oil spill.

- American Journal of Applied Sciences* **2(5)**: 939–946.
<https://doi.org/10.3844/ajassp.2005.939.946>.
- Bougeard, M., Le Saux, J.-C., Pérenne, N., Baffaut, C., Robin, M., Pommepuy, M. (2011). Modeling of *Escherichia coli* fluxes on a catchment and the impact on coastal water and shellfish quality. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, **47(2)**: 1–17. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00520.x>.
- Bitton, G. (1998). Formula handbook for environmental engineers and scientists. Gainesville, Florida: 51–56.
- Chan, Y. (2010). Field and laboratory studies of *E. coli* decay rate at a coastal beach with reference to storm events. Magistrska naloga. Hong Kong, Univerza v Hong Kongu: 182 str.
<https://doi.org/10.1016/j.jher.2014.08.002>.
- Davies, C. M., Long, J. A. H., Donald, M., Ashbolt, N. J. (1995). Survival of fecal microorganisms in marine and fresh-water sediments. *Appl. Environ. Microbiol.* **61(5)**: 1888–1896. [https://doi.org/0099-2240/95/\\$04.0010](https://doi.org/0099-2240/95/$04.0010).
- De Marchis, M., Freni, G., Napoli, E. (2013). Modelling of *E. coli* distribution in coastal areas subjected to combined sewer overflows. *Water Sci. Technol.* **68 (5)**: 1123–1136. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.353>.
- Desmarais, T. R., Solo-Gabriele H. M., C. J. Palmer. (2002). Influence of soil on fecal indicator organisms in a tidally influenced subtropical environment. *Appl. Environ. Microbiol.* **68(3)**: 1165–1172. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.3.1165-1172.2002>.
- Eadie, B. J., Schwab, D. J., Johengen, T. H., Lavrentyev, P. J., Miller, G. S., Holland, R. E., Leshkevich, G. A., Lansing M. B., Morehead, N. R., Robbins J. A., Hawley N., Edgington D. N., Van Hoo, P. L. (2002). Particle transport, nutrient cycling, and algal community structure associated with a major winter-spring sediment resuspension event in southern Lake Michigan. *J. Great Lakes Res.* **28**: 324–337. [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(02\)70588-1](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(02)70588-1).
- Escherichia coli* (2017). http://www.redorbit.com/reference/escherichia_coli/ (pridobljeno 13. 9. 2017).
- Galuf, S. (2005). Simulacija razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 69 str.
- Garcia-Barcina, J. M., Oteiza, M., Sota, A. D. L. (2002). Modelling the faecal coliform concentrations in the Bilbao estuary. *Hydrobiologia* **475–476**: 213–219. <https://doi.org/10.1023/A:1020317309634>.
- Gruber, A. K., Shelton, D. R., Pachepsky, Y. A. (2005). Effect of manure on *Escherichia coli* attachment to soil. *J. Environ. Qual.* **34**: 2086–2090. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0039>.
- Hipsey, M. R., Brookes, J. D., Regel, R. H., Antenucci, J. P., Burch, M. D. (2006). In situ evidence for the association of total coliforms and *Escherichia coli* with suspended inorganic particles in an Australian reservoir. *Water Air Soil Pollut.* **170**: 191–209. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-3010-6>.
- Huang, G., Falconer, R., Lin, B. (2017). Integrated hydro-bacterial modelling for predicting bathing water quality. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **188**: 145–155. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2017.01.018>.
- Jarc, G. (2014). Dejavniki, ki vplivajo na preživetje *Escherichie coli* v morskem okolju. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. 68 str.
- Katalog plaž. (2014). <http://www.obala.net/katalog/plaze> (pridobljeno 17. 9. 2017).
- Lehr, W., Robert, J., Evans, M., Simecek-Beatty, D., Overstreet, R. (2002). Revisions of the ADIOS oil spill model. *Environmental Modelling and Software* **17**: 191–199. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00064-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00064-0).
- Lešek, A. (2018). Uporaba metode sledenja delcev za modeliranje transporta in odmiranja *Escherichie coli* v morju. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. 131 str.
- Li, J., McLandsborough, L. (1999). The effects of the surface charge and hydrophobicity of *Escherichia coli* on its adhesion to beef muscle. *Int. J. Food Microbiol.* **53(2–3)**: 185–193. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(99\)00159-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(99)00159-2).
- Lytle, D. A., Rice, E. W., Johnson, C. H., Fox, K. R. (1999). Electrophoretic mobilities of *Escherichia coli* O157: H7 and wild-type *Escherichia coli* strains. *Appl. Environ. Microbiol.* **65(7)**: 3222–3225.
- Malačič, V., Čermelj, B., Bajt O., Ramšak, A., Petelin, B., Žagar, D., Vodopivec, M., Forte, J. (2009). Cirkulacija in okoljske razmere v Koprskem zalivu in Luki Koper. Fazno poročilo 3. Naročnik: Luka Koper d.d., izvajalec: Nacionalni inštitut za biologijo, Morska biološka postaja, Poročila MBP št. 113, 97 str.
- Mancini, J. L. (1978). Numerical estimates of coliform mortality rates under various conditions. *Journal of Water Pollution Control Federation* **50(11)**: 2477–2484.

- Martin, Y., Troussellier, M., Bonnefont, J-L. (1998). Adaptive responses of *E. coli* to marine environmental stresses: a modelling approach based on viability and dormancy concepts. *Oceanologica Acta*, **21**(6): 951–964. [https://doi.org/10.1016/S0399-1784\(99\)80018-8](https://doi.org/10.1016/S0399-1784(99)80018-8).
- Meteorološki in ekološki podatki za Koper. Urne vrednosti globalnega sončnega sevanja. 2017. http://193.95.233.105/econova1/Html/Urne_02.aspx?me sto=Koper (pridobljeno 15. 12. 2017).
- Ogorelec, B., Mišič, M., Faganeli, J., Stegnar, P., Vrišer, B., Vukovič, A. (1987). The recent sediment of the Bay of Koper (Northern Adriatic). *Geologija* **30**: 87–121. 551.8(262.3-17)
- Ostaneč Jurina, T., Šoško, H., Žagar, D. (2014). Primerjava modelov širjenja nafte na morju po metodah trajektorij in koncentracij – Comparison of trajectory and concentration methods in oil spill modelling at sea. *Acta hydrotechnica* **27/47** (2014): 43–56.
- Outtara, N.K., Brauwere, A., Billen, G., Servais, P. (2013). Modelling faecal contamination in the Scheldt drainage network. *Journal of Marine Systems* **121**: 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.05.004>.
- Palazón A., López, I., Aragonés, L., Villacampa, Y., Navarro-González, F. (2017). Modelling of *Escherichia coli* concentrations in bathing water at microtidal coasts. *Science of the Total Environment* **593–594**: 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.161>.
- Rajar, R., Četina, M. (1997). Hydrodynamic and water quality modelling: An experience. *Ecological Modelling* **101**: 195–207. [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(97\)00047-1](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(97)00047-1).
- Rajar, R., Žagar, D., Širca, A., Horvat, M. (1998). Two- and three-dimensional modelling of mercury transport in the Gulf of Trieste. V: BREBBIA, C. A. (ur.). Second International Conference on Environmental Coastal Regions held in Cancun. Mexico, Environmental coastal regions, Environmental studies. Boston, Southampton, WIT Press, 1998: 289–300. <https://doi.org/10.2495/CENV980271>.
- Reed, M., Johansen, Ø., Brandvik, P.J., Daling, P., Lewis, A., Fiocco, R., Mackay, D., Prentki, R. (1999). Oil spill modeling towards the close of the 20th century: Overview of the state of the art. *Spill Science and Technology Bulletin* **5**(1): 3–16. [https://doi.org/10.1016/s1353-2561\(98\)00029-2](https://doi.org/10.1016/s1353-2561(98)00029-2).
- Roper, M. M., Marshall K. (1979). Effects of salinity on sedimentation and of participates on survival of bacteria in estuarine habitats, *Geomicrobiol. J.* **1**(2): 103–116. <https://doi.org/10.1080/01490457909377727>.
- Rozen, Y., Belkin S. (2001). Survival of enteric bacteria in seawater. *FEMS Microbiology Reviews* **25**: 513–529. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2001.tb00589.x>.
- Sinton, L. W. (2005). Biotic and abiotic effects in oceans and health: pathogens in the marine environment, edited by S. Belkin and R. R. Colwell: 69–92.
- Soczka Mandac, R., Žagar, D. (2018). Spatial distribution of suspended solids during short-term high river discharge in the Bay of Koper, northern Adriatic Sea. *Mediterranean Marine Science* **19**(1): 36–47. <http://dx.doi.org/10.12681/mms.2141>.
- Soczka Mandac, R., Harpha Sea, d.o.o. (2013). Meritve Secchijeve globine v Tržaškem zalivu. Osebna komunikacija (4. 7. 2014).
- Širca, A. (1992). Modeliranje transporta polutantov po metodi sledenja delcev. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FAGG (samozaložba A. Širca): 87 str.
- Šoško, H. (2012). Modeliranje širjenja nafte v morskem okolju po metodi trajektorij. Diplomski naloga. Ljubljana, UL FGG (samozaložba Šoško, H.): 59 str.
- Terzić, E. (2015). Modeliranje zadrževalnega časa vode v Tržaškem zalivu. Diplomski naloga. Ljubljana, UL FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer, 67 str.
- Thupaki, P., Phanikumar, M. S., Schwab D. J., Nevers, M. B., Whitman, R. L. (2013). Evaluating the role of sediment-bacteria interactions on *Escherichia coli* concentrations at beaches in southern Lake Michigan. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **118**: 7049–7065. <https://doi.org/10.1002/2013JC008919>.
- Wang, X. H., Pinardi, N., Malačič, V. (2007). Sediment transport and resuspension due to combined motion of wave and current in the northern Adriatic Sea during a Bora event in January 2001: A numerical modelling study. *Continental Shelf Research* **27**(5): 613–633. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.10.008>.
- Zhongfu G., Whitman, R.L., Nevers, M.B., Phanikumar, M.S., Byappanahalli, M.N. (2012). Nearshore hydrodynamics as loading and forcing factors for *Escherichia coli* contamination at an embayed beach. *Limnol. Oceanogr.*, **57**(1): 362–381. <https://doi.org/10.4319/lo.2012.57.1.0362>.
- Žagar, D. (1994). Tridimenzijski model za simulacijo širjenja nafte. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in

geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 63 str.

Žagar, D. (1999). Razvoj in aplikacija tridimenzionalnega modela za simulacijo transporta in procesov pretvorb živega srebra v Tržaškem zalivu. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 101 str.

Žagar, D., Četina, M. (2011). Končno poročilo o izdelavi strokovne naloge NAFTA3D. Poročilo UL FGG. Ljubljana, Katedra za mehaniko tekočin: 22 str.

Žagar, D., Ramšak, V., Ličer, M., Petelin, B., Malačič, V. (2012). Uporaba numeričnih modelov ob razlitjih nafte na morju. *Ujma* **26**: 168–174.