

# ANALIZA PRONOSA LIČINKI IZ BALASTNIH VODA U AKVATORIJU LUKE PLOČE

**prof. dr. sc. Goran Lončar**

Sveučilište u Zagrebu,  
Građevinski fakultet,  
Kačićeva 26, Zagreb, Hrvatska  
e-mail: gloncar@grad.hr

**Tin Kulić, mag. ing. aedif.**

Sveučilište u Zagrebu,  
Građevinski fakultet,  
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

**izv. prof. dr. sc. Romina Kraus**

Institut Ruder Bošković,  
Centar za istraživanje mora,  
G. Paliage 5, Rovinj, Hrvatska

**izv. prof. dr. sc. Dalibor Carević**

Sveučilište u Zagrebu,  
Građevinski fakultet,  
Kačićeva 26, Zagreb, Hrvatska

**izv. prof. dr. sc. Marijana Pećarević**

Sveučilište u Dubrovniku,  
Odjel za primijenjenu ekologiju,  
Ćira Carića 4, Dubrovnik, Hrvatska

Za akvatorij luke Ploče uspostavljen je 3D numerički model cirkulacije mora i pronosa ličinki unesenih na fiksnoj poziciji lučkog terminala uslijed ispuštanja balastnih voda iz brodskih tankova. Modelske čestice ličinki nisu pasivne, već imaju senzoričku sposobnost prepoznavanja okolišnih uvjeta i kognitivne reakcije u vidu promjene smjera i intenziteta svoga kretanja (ABM, eng: agent based model) u smjeru optimalnog intenziteta svjetlosti i temperature mora. Modelske simulacije su provedene za razdoblje 12.3.2008.-10.5.2008., uz primjenu izmjerenog protoka i temperature rijeke Neretve na postaji Žitomislići (polusatna rezolucija), modelskih rezultata brzine i smjera vjetra iz numeričkog modela Aladin-Hr (trosatna rezolucija), satne dinamike morskih razina i izmjerene vertikalne raspodjele temperature i saliniteta mora na otvorenoj granici modela (CTD sonda). Čestice ličinki unose se u 4 termina (14.3., 22.3., 7.4. i 20.4.2008.), na početku situacija sa registriranom karakterističnom kombinacijom okolišnih uvjeta („mali“ ili „veliki“ protok Neretve sa „malom“ ili „velikom“ brzinom vjetra iz smjerova ENE, SW, S i E). Rezultati provedenih simulacija pokazuju da u situaciji većeg protoka Neretve i manjih brzina vjetra (prosječno za 7 dana nakon termina unosa ličinki  $Q_{SR-7dana} = 490 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $W_{SR-7dana} = 2.9 \text{ m/s}$ ) dolazi do najizraženije sedimentacije ličinki u zatvorenom dijelu lučkog bazena. S druge strane, u slučaju manjeg protoka Neretve i većih brzina vjetra ( $Q_{SR-7dana} = 114 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $W_{SR-7dana} = 3.7 \text{ m/s}$  u rasponu smjerova S-SW) ličinke se intenzivno pronose u SE smjeru pružanja neretvanskog kanala.

**Ključne riječi:** luka Ploče, balastne vode, ličinke, ABM model

## 1. UVOD

Primarni put unošenja stranih vrsta (eng: non-indigenous species - NIS) u europskim morima je vezan uz pomorstvenu djelatnost, primarno kroz izmjenu balastnih voda i prijenos vrsta u obraštaju na oplati broda (Katsanevakis i sur., 2013.). U balastnim su vodama prisutne planktonske zajednice koje su iznimno bogate

i brojne, jer samo rijetki primjeri među svim poznatim morskim vrstama, u nekom od stadija životnog ciklusa, prije svega ličinskom, ne uključuju i planktonski oblik života (Verity i Smetacek, 1996.). Unesene vrste, koje su izložene pronosu uokolo mjesta ispuštanja balastnih voda, nerijetko su u ranom životnom stadiju i obzirom na

okolnu akvatičku biocenozu iskazuju invazivni karakter (Cardeccia i sur., 2016.). Pri tome degradacija staništa, onečišćenje i nestanak autohtonih vrsta oslobađaju ekološke niše i stranim vrstama omogućuju invazivnost pa su modificirana staništa u obalnom području, kao što su luke ili područja komercijalnog akvakulturnog uzgoja, posebno ugrožena (Ojaaver i sur., 2014.).

Prepoznate strane vrste koje su sposobne za uspješno naseljavanje (preživljavanje i razvoj) zahtijevaju detaljnije praćenje (Catford i sur., 2012.). Rezultati istraživanja karakteristika 68 najraširenijih višestaničnih stranih vrsta u europskim morima ukazali su da sposobnost njihove kolonizacije ovisi o sposobnosti njihovog disperzivnog širenja (pronosa), brzini reprodukcije i ekološke prilagodbe (Cardeccia i sur., 2016.). Generalna profilacija idealne invazivne vrste u morskim ili prijelaznim (bočatim) vodama nije moguća zbog heterogenih bioloških karakteristika, čak i u slučajevima kada se ona unosi samo iz jednog tipiziranog izvora poput broda.

Prema Međunarodnoj konvenciji za kontrolu i upravljanje balastnim vodama i talozima brodova (eng: International Convention for the Control and Management of Ship's Ballast Water and Sediments, 2004; Ballast Water Management (BWM) Convention), svi akvatički organizmi koji predstavljaju opasnost za okoliš, ljudsko zdravlje ili raspoloživi resurs, te ugrožavaju biološku raznolikost, pripadaju grupi štetnih akvatičkih organizama i patogena (eng: harmful aquatic organisms and pathogens, HAOP (IMO, 2004., 2005.)). U sklopu projekta BALMAS (Kraus i sur. 2019.b.) definirano je nulto stanje za 12 luka Jadrana (Joint Port Baseline Surveys - PBS) u pogledu HAOP-a, te su istražene planktonske zajednice koje uključuju holoplanktonske i meroplanktonske vrste, odnosno vrste koje u sastavu planktona provode cijeli ili samo dio životnog vijeka. Procjena nultog stanja omogućuje daljnje kontinuirano praćenje i uočavanje novonešenih stranih vrsta u lukama u svrhu ranog obavještanja i mjera sanacije kako bi se na vrijeme spriječilo sekundarno širenje stranih vrsta iz luke u širi akvatorij (Magaletti i sur., 2018.). Obzirom na do sada provedene aktivnosti u okviru BALMAS projekta, zaključeno je da nedostaju podatci vezani uz elemente pronosa unesenih organizama (polja strujanja, disperzija i sedimentacija/akumulacija) uokolo mjesta unosa, odnosno u i uokolo akvatorija samih luka (Kraus i sur. 2019.a.).

Colby (1988.) je iznio tvrdnju da se pronos živih organizama poput ličinki može promatrati kao pasivni advektivno-disperzijski proces samo na razini nulte hipoteze. Woods i Hargis (1971.) proveli su komparativno istraživanje pronosa sitnozrnih čestica ugljena i ličinki kamenice, te su došli do zaključka da se ličinke ne pronose sasvim pasivno. Slično tome, Arnold i sur. (2005.) pratili su kohortu ličinki kunjke i boje s istim inicijalnim pozicijama, te su došli do zaključka da se nakon određenog vremena njihova prostorna razdioba značajno razlikuje. Evaluaciju važnosti pojedinih fizikalnih procesa

i doprinosa autonomne mobilnosti ličinke u ukupnom pronosu ličinke dao je Hare i sur. (2002.).

Većina ličinki doživljava transformacije tijekom rane životne faze (McCormick, 2006.), a karakteristike pelagičkog okruženja utječu na njihovo preživljavanje i razvoj. Pri tome okolna temperatura ima glavnu ulogu u regulaciji metabolizma i rasta (Houde, 1989.; Sponaugle i Grorud-Colvert, 2006.). Ličinke daju bihevioralni odgovor na niz podražaja, poput intenziteta svjetla, temperature vode, intenziteta turbulencije i raspoloživosti plijena (DiBacco i sur., 2001.), što je potvrđeno i in-situ opažanjem i provedbom laboratorijskih eksperimenata (Scotti i Pineda, 2007.). Gerlach i sur., (2007.) temeljem provedenih istraživanja eksplicitno zaključuju da se ličinke mogu orijentirati i kretati horizontalno/vertikalno nakon primanja svjetlosnog, zvučnog ili elektromagnetskog podražaja. Očigledno je da su ličinke kompleksni organizmi sa razvijenom sposobnosti nalaženja hrane i izbjegavanja predatora u pelagijalu. Stoga u modelu pronosa ličinki kognitivni aspekt igra važnu ulogu i treba biti unesen u matematičku formulaciju problema zajedno sa fizikalnim elementima procesa. Formulacija adaptabilnog biheviorističkog ponašanja individualnog organizma u promjenjivim okolišnim uvjetima upravo su okosnica tzv. „agent-based“ modelskih simulacija (ABMs).

Agent-based modeli (ABM) je relativno novi modelski pristup analizi sustava jedinki koje imaju međusobnu interakciju i/ili interakciju sa okolinom (Macal i North, 2010.). Razvoj računalnih resursa omogućio je rastući broj aplikacija ABM metodologije u širokom rasponu znanstvenih disciplina. Temeljna ideja ABM-a je sadržana u tome da se modelski sustav koncentrira na opis akcije i interakcije pojedinačnih elemenata sustava (agenata) sa okolišem, a ne na poopćenu (globalnu) fenomenologiju (Epstein, 2007.). Kompleksnost ABM-a ovisi o postavljenim ciljevima pri uspostavi samog modela.

U ovom radu dan je prikaz primjene izvorno uspostavljenog ABM pronosa ličinki korištenjem platforme za ekološko modeliranje ECOLab u okviru modelskog sustava MIKE ([www.dhigroup.com](http://www.dhigroup.com)). Pokriveni su sljedeći modelski aspekti procesa pronosa ličinki: fizikalna komponenta kroz primjenu hidrodinamičkog modela (strujanje sa skalarnim poljima temperature i saliniteta mora), bihevioristička komponenta (vertikalno gibanje ličinki prema optimalnom intenzitetu svjetla), biološka komponenta (rast, mortalitet, sedimentacija ličinki). Ličinke se u morski okoliš unose iz broda vezanog na poziciji lučkog terminala u luci Ploče.

## 2. MATERIJALI I METODE

### 2.1. Specifikacija istraživanog područja

Luka Ploče nalazi se na području južnog Hrvatskog primorja i smještena je u zaljevu oko tri kilometra udaljenom od rijeke Neretve, u području između njene

delte i brdovitim krških predjela. S južne i jugozapadne strane zaljev zatvara poluotok Pelješac koji djeluje kao prirodni lukobran. Luka Ploče je višenamjenska luka za prekrcaj gotovo svih vrsta roba zastupljenih u međunarodnom pomorskom prometu te jedna od glavnih strateških hrvatskih luka, jer ima vrlo povoljan prirodni i prometni položaj. Prekrcaj, skladištenje i ostale popratne usluge obavljaju se na terminalima koji su raspoređeni na 7 operativnih obala u Pločama s gazom do 13 m. Rijeka Neretva je područje iznimne ekološke važnosti, a delta Neretva je jedino u Hrvatskoj i jedno od posljednjih močvarnih staništa u Sredozemlju, zbog čega je zaštićena na nacionalnoj i međunarodnoj razini. U luku, uz redovite trajektne linije, uplovljavaju većinom teretni brodovi, pri čemu se glavina prometa odvija između luka u Sredozemnom moru. Iako je u fokusu ovog rada akvatorij luke Ploče, potrebno je napomenuti da se prikazana metodologija može primijeniti i za druga područja.

## 2.2. Hidrološke, vjetrovne i oceanografske podloge

Polje strujanja u predmetnom akvatoriju dominantno je pod utjecajem protoka rijeke Neretve (hidrološka značajka), brzine i smjera vjetra (atmosferska značajka), plimne dinamike, te utjecaja temperature i saliniteta vode (značajka morske i riječne sastavnice okoliša). Stoga su u sklopu implementacije numeričkog modela strujanja korištene sve prethodno navedene kategorije potrebnih podataka. Osim toga, za model agenta, potrebni su podatci o intenzitetu svjetla i prozirnosti mora (okolišni uvjeti), a koji su usvojeni iz rezultata mjerenja, ili su preuzeti iz javno dostupnih izvora podataka.

Rijeka Neretva je regulirana (nema prirodni režim otjecanja), a prva postaja nakon koje nema značajnih

pritoka ni regulacije protoka je Žitomislići. Na raspolaganju su podatci o dnevnom režimu protoka i temperature rijeke Neretve na postaji Žitomislići za razdoblje 2004.–2014. godine (Federalni hidrometeorološki zavod BIH), te na postaji Metković za razdoblje 2015.–2018. Izmjereni minimalni, srednji i maksimalni dnevni protoci i temperatura rijeke Neretve za razdoblje 2004.–2018. prikazani su u [tablici 1](#).

Iz [tablice 1](#) je razvidno da maksimalni dnevni protok tijekom razdoblja 2004.–2018. iznosi 2082 m<sup>3</sup>/s (2.12.2010.). Minimalni dnevni protok je registriran s vrijednošću 51,9 m<sup>3</sup>/s (17.9.2010.). Obzirom na termine minimalnih i maksimalnih protoka može se konstatirati da se maksimalni protoci pojavljuju tijekom zime, ranog proljeća ili kasne jeseni, dok su minimalni protoci vezani uz ljetni režim otjecanja.

Relativna i kumulativna frekvencija izmjerenih protoka Neretve za razdoblje 2015.–2018. (postaja Metković), s podjelom u razrede od 0 do 1600 m<sup>3</sup>/s i korakom 50 m<sup>3</sup>/s, prikazane su na [slici 1](#). Sa [slike 1](#) je prepoznato da se približno 65% vremena protok pojavljuje u rasponu 100 – 300 m<sup>3</sup>/s, te približno 25% vremena u rasponu 300 – 700 m<sup>3</sup>/s.

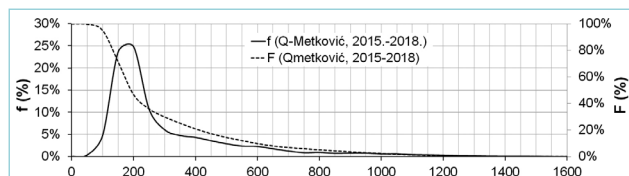
Na [slici 2](#) prikazane su izmjerene vrijednosti protoka i temperature rijeke Neretve na mjernoj postaji Žitomislići tijekom simulacijskog razdoblja 12.3.2008. – 13.5.2008. (podatci polusatne razlučivosti). Na [slici 3](#) prikazane su pozicije oceanografskih postaja JPG-7 i PL102 (Andročec i sur., 2009.). Na postaji JPG-7 je CTD sondom izmjerena vertikalna raspodjela temperature i saliniteta mora u terminima 12.3.2008. i 13.5.2008., dok je na postaji PL102 mjerena temperatura i salinitet mora u površinskom sloju mora, na dubinama 5 i 10 m, te u pridonom sloju na dubini 18 m (IOR, 2013.).

Sa [slikom 2 i 3](#) može se prepoznati da je pri protoku Neretve od 430 m<sup>3</sup>/s u površinskom sloju mora na poziciji

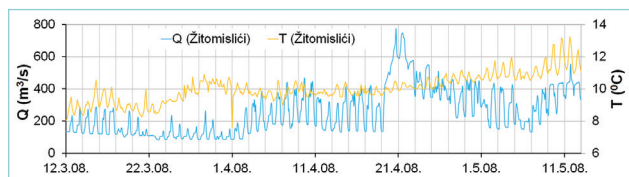
**Tablica 1:** Izmjereni minimalni, srednji i maksimalni dnevni protoci i temperatura rijeke Neretve (mjerna postaja Žitomislići i Metković) za razdoblje 2004.–2018.

Godina	Q <sub>MIN</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Datum <sub>MIN</sub>	Q <sub>SR</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>MAX</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Datum <sub>MAX</sub>
2004.	63	22.8.2004	276	1342	11.4.2008
2005.	70.6	14.8.2005	230	913	29.12.2005
2006.	66.7	11.7.2006	215	1120	2.1.2006
2007.	58.3	23.8.2007	180	602	14.2.2007
2009.	59.3	22.9.2009	252	1095	28.12.2009
2010.	51.9	17.9.2010	401	2082	2.12.2010
2011.	58	28.9.2011	155	681	18.3.2011
2012.	63.2	7.9.2012	180	846	24.4.2012
2013.	75.1	15.8.2013	-	1413	3.4.2013
2014.	-	-	-	-	-
2015.	114.1	5.8.2015	213	1150	17.10.2015
2016.	127.6	28.7.2016	313	1002	8.3.2016
2017.	92.0	15.9.2017	235	1168	17.12.2017
2018.	106.1	1.8.2018	353	1357	21.3.2018

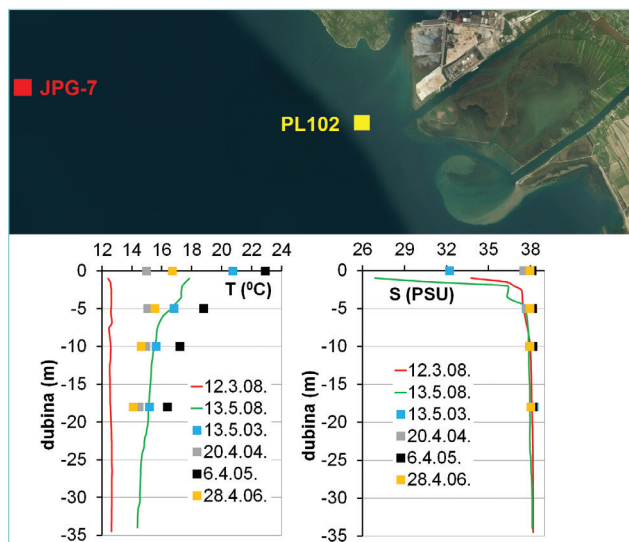
postaje JPG-7 registriran salinitet 27 PSU (1 PSU = 1 g/l) (13.5.2008.), dok je pri protoku Neretve od 135 m<sup>3</sup>/s (12.3.2008.) registriran salinitet 33.7 PSU. Nadalje, mjerenja na postaji PL102 u prethodnim godinama (2003.-2007.), i istom kalendarskom razdoblju, također pokazuju da se smanjenje saliniteta mora uokolo ušća pojavljuje u površinskom sloju mora ovisno o protocima Neretve, a maksimalno do dubine 5 m (GFZ, 2009.). Sa slike 3 se može uočiti da su promjene temperatura mora najizraženije u površinskom sloju do dubine 10 m. Prezentirani rezultati mjerenja temperature i saliniteta mora korišteni su i u sintezi rubnih uvjeta za skalarna polja na otvorenoj granici numeričkog modela, a kako je to objašnjeno u nastavku. Temperatura mora u akvatoriju uokolo ušća je kroz cijelu godinu viša od temperature Neretve na poziciji Žitomislčići, a tijekom ljetnih mjeseci ta razlika dostiže približno 8 - 10 °C (Slika 4).



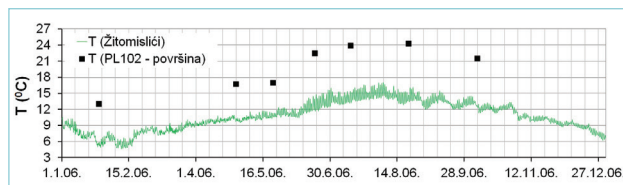
Slika 1: Relativna (f) i kumulativna (F) frekvencije izmjerenih protoka Neretve za razdoblje 2015.-2018. (postaja Metković) s podjelom u razrede od 0 do 1600 m<sup>3</sup>/s i korakom 50 m<sup>3</sup>/s



Slika 2: Vremenski nizovi polusatnih protoka i temperature rijeke Neretve na mjernejoj postaji Žitomislčići za razdoblje numeričkih simulacija



Slika 3: Izmjerene vrijednosti vertikalne raspodjele temperature i saliniteta mora u terminima 12.3.2008. i 13.5.2008. na postaji JPG-7 ( $\phi = 43.033$  ;  $\lambda = 17.329$ ), te 13.5.2003., 20.4.2004., 6.4.2005. i 28.4.2006. na postaji PL102 (kvadratičim su označeni rezultati mjerenja na postaji PL102, a kontinuiranim linijama na postaju JPG-7)



Slika 4: Temperatura mora na postaji PL102 (slika 3) i rijeke Neretve na postaji Žitomislčići

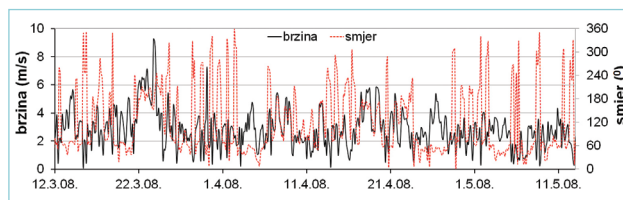
Mjerenje prozirnosti mora sa Secchi pločom provedeno je u ožujku i svibnju 2013. godine na poziciji postaje PL102 (IOR, 2013.), te u svibnju 2016. godini u samoj luci Ploče (Kraus i sur., 2019.a.). Izmjerene vrijednosti prikazane su u tablici 2. Za dnevni hod intenziteta svjetla na površini mora i lokaciji Ploče u simulacijskom razdoblju 12.3.2008. - 13.5.2008. korišteni su podatci preuzeti sa [www.weatherspark.com](http://www.weatherspark.com).

Tablica 2: Izmjerene prozirnosti mora sa Secchi pločom

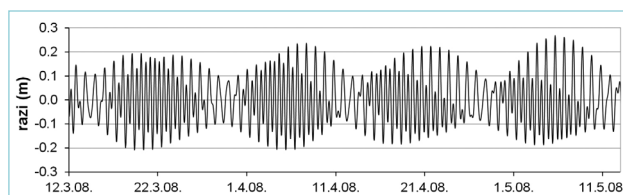
Datum	Pozicija	Secchi dubina (m)
3.2013.	PL102	6
5.2013.	PL102	11
5.2016.	Luka Ploče	7.5

Polje vjetra za simulacijsko razdoblje 12.3.2008. - 13.5.2008. dobiveno je ekstrakcijom podataka iz rezultata numeričkog atmosferskog modela Aladin-Hr (prostorna rezolucija 8 km, vremenska rezolucija 3 sata, slika 5).

Vremenska serija morskih razi za simulacijsko razdoblje 12.3.2008. - 13.5.2008. dobivena je primjenom podataka o amplitudama i fazama 7 osnovnih harmonijskih komponenti plimnog signala za lokaciju Ploče (slika 6, HHI, 2003.).



Slika 5: Vremenski nizovi brzine i smjera vjetra za lokaciju Ploče iz numeričkog atmosferskog modela Aladin-Hr s trosatnom rezolucijom podataka



Slika 6: Vremenska serija morskih razi dobivena primjenom podataka o amplitudama i fazama 7 osnovnih harmonijskih komponenti plimnog signala za lokaciju Ploče [O1 (0.0255 m, 42.7°), P1 (0.0263 m, 46.2°), K1 (0.0793 m, 52°), N2 (0.0154 m, 119.4°), M2 (0.0931 m, 119.7°), S2 (0.0641 m, 121.8°), K2 (0.0194 m, 114.9°); HHI, 2003.]

### 2.3. Hidrodinamički model

Fizikalni procesi djeluju na širenje i zadržavanje ličinki tijekom njihovog pelagičkog razdoblja, kao i na uvjete o kojima ovisi njihovo preživljavanje i razvoj (npr. prozirnost i temperatura mora), a za pojedine organizme i na proces njihovog tonjenja nakon okončanja pelagičkog razdoblja. Stoga hidrodinamički model treba omogućiti simulaciju ključnih fizikalnih procesa koji su povezani sa karakterističnim kognitivnim principima ponašanja ličinki (primjerice njihove vertikalne migracije). Za potrebe ovog istraživanja korišten je 3D hidrodinamički numerički model MIKE 3fm (www.dhigroup.com), zasnovan na metodologiji konačnih volumena, uz primjenu rubnih uvjeta na otvorenim granicama modela ili na kontaktu sa atmosferom prema navodima u prethodnom poglavlju.

Za potrebe modeliranja polja strujanja i pronosa ličinke odabrana je prostorna domena numeričkog modela prikazana na slici 7. Na slici 7 naznačene su otvorene granice (linije žute i crvene boje). Krute granice odgovaraju kontaktnoj liniji akvatorijalnog dijela sa linijom prirodne ili umjetne obale. Te granice su nepropusne i kroz njih nema fluksa polja brzina.

Batimetrijska podloga dobivena je temeljem nautičkih karata mjerila 1:25000 (www.navionics.com), te primjenom bilinearne interpolacije za pozicije numeričkih čvorova na kojima nema definiranih dubina. Modelska prostorna domena diskretizirana je s nestrukturiranim mrežom (prizmatične ćelije, trokuti u horizontalnoj ravnini) konačnih volumena (slika 7). Prostorni korak između numeričkih čvorova smještenih u težištu konačnih volumena je varijabilan od 15 m u blizini obalne crte do 150 m na području najvećih dubina (slika 7). U vertikalnom smjeru korišten je jedan sigma sloj debljine 1 m te ispod njega „z“ koordinata s debljinom ćelije od 2 m.

Na otvorenoj granici „more“ (slika 7) model je forsiran dinamikom morskih razli prema prikazu sa slike

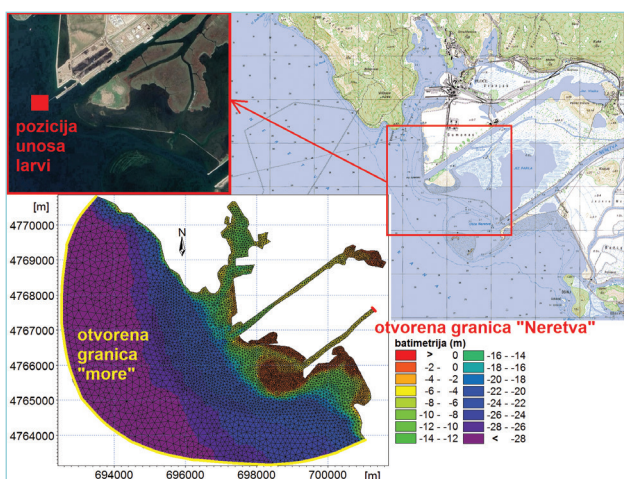
6, te poljima temperature i saliniteta mora s vertikalnom razdiobom prikazanom na slici 3. Za početne uvjete temperature i saliniteta mora korištene su izmjerene vertikalne razdiobe u terminu 12.3.2008. (slika 3). Na otvorenoj granici „Neretva“ korišteni su izmjereni protoci i temperatura Neretve prema prikazu sa slike 2. Salinitet Neretve je usvojen s vrijednosti 0 PSU. Na kontaktu mora i atmosfere primijenjeno je homogeno i nestacionarno polje vjetra s obilježjima prikazanim na slici 5, pri čemu je za koeficijent trenja usvojena vrijednost 0,00185 (Wu, 1994.).

Zatvaranje modela turbulencije oslanja se na  $k-\epsilon$  formulaciju (Rodi, 1987.) u vertikalnom smjeru i Smagorinsky koncept (Smagorinsky, 1993.) u horizontalnom smjeru. Koeficijenti turbulentne disperzije za skalarna polja temperature i saliniteta definirani su faktorima proporcionalnosti (Prandtllov broj) 0.9 u vertikalnom smjeru i 0.12 u horizontalnom smjeru (Lončar i sur., 2013.). Faktori proporcionalnosti za polja turbulentne kinetičke energije ( $TKE$ ) i disipacije ( $\epsilon$ ) usvojeni su s vrijednostima 1 ( $TKE$ ) i 1.3 ( $\epsilon$ ) u horizontalnom i vertikalnom smjeru (Rodi, 1987.). Hrapavost i Smagorinsky koeficijent u modelu su usvojeni kao prostorno homogeni s vrijednostima 0.01 m i 0.2 (Bartolić i sur., 2018.). Toplinska izmjena s atmosferom nije uzeta u obzir. Vertikalna raspodjela intenziteta svjetlosti u numeričkom modelu proračunata je prema eksponencijalnom Lambert - Beerovom zakonu, u kojem je za koeficijent svjetlosnog zamiranja usvojena vrijednost 0.307 (Secchi dubina / 2.3, Jorgensen i Bendoricchio, 2001.). Slična metodologija u pristupu provedbe numeričkih simulacija strujanja mora u zaljevima i estuarijima korištena je i prezentirana u radovima (Lončar i sur., 2020. ; Chen i sur., 2016. ; He i sur., 2018. ; Hwang i sur., 2017. ; Shaba i sur., 2013. ; Yuan i sur., 2015.)

Proračunata polja brzine strujanja, temperature i saliniteta mora te vertikalne raspodjele intenziteta svjetlosti kroz stupac mora u sklopu hidrodinamičkog dijela numeričkog modela koriste se u implementaciji „Agent based“ modela (ABM) pronosa diskretnih čestica ličinke. Pomak svake čestice ličinke u horizontalnom smjeru je definiran kroz sumu determinističke komponente strujanja iz rezultata hidrodinamičkog dijela modela i stohastičke komponente uslijed turbulentne disperzije na prostornoj skali manjoj od prostorne razlučivosti proračunske mreže. Stoga je vektor brzine definiran sljedećom običnom diferencijalnom jednačinom:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{v}(\vec{x}, t) \quad (1)$$

gdje je: vektor horizontalne brzine (proračunat hidrodinamičkim modelom strujanja) sa komponentama  $u$  i  $v$  u  $x$  i  $y$  smjeru; trenutna prostorna koordinata čestice.



Slika 7: Akvatorijalno područje s batimetrijskom podlogom (1:25000) na kojem je usvojena prostorna domena numeričkog modela za provedbu numeričkih simulacija cirkulacije mora i pronosa ličinki (primijenjena modelska diskretizacija s konačnim volumenima)

Doprinos turbulentne disperzije je definiran kao slučajni i neovisan Markovljev proces (Gardiner, 1985.), proračunat metodom slučajnog koraka kroz rješavanje Langevin nelinearne jednadžbe (Kloeden i Platen, 1999.):

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = \vec{A}(\vec{x}, t) + \mathbf{B}(\vec{x}, t)\vec{\xi}(t) \quad (2)$$

gdje je: vektor determinističke komponente polja strujanja (odgovara vektoru iz jednadžbe 1); tenzor disperzije (stohastička komponenta); vektor slučajnog broja između 0 i 1.

Jednadžba (1) je ekvivalentna stohastičkoj diferencijalnoj jednadžbi (3):

$$d\vec{x}(t) = \vec{A}(\vec{x}, t)dt + \mathbf{B}(\vec{x}, t)d\vec{W}(t) \quad (3)$$

gdje je: slučajni Wienerov proces sa srednjom vrijednosti 0 i kvadratom srednje vrijednosti koji je proporcionalan  $dt$ .

Neznate vrijednosti  $\mathbf{A}$  i  $\mathbf{B}$  se proračunavaju iz Fokker-Planck jednadžbe (4) (Kloeden i Platen, 1999.):

$$d\vec{x}(t) = \begin{pmatrix} u(\vec{x}, t) \\ v(\vec{x}, t) \end{pmatrix} dt + \begin{bmatrix} \sqrt{2D_x} & 0 \\ 0 & \sqrt{2D_y} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{pmatrix} \sqrt{dt} \quad (4)$$

gdje su:  $Z_1, Z_2$  neovisni slučajni brojevi sa normalnom distribucijom oko srednje vrijednosti i jediničnom varijancom;  $D_x, D_y$  koeficijenti disperzije u  $x$  i  $y$  smjeru.

U razdoblju od inicijalnog unosa ličinke, do dosezanja njenog terminalnog stanja, ličinka se u vertikalnom smjeru kreće apsolutnom brzinom koja je suma vertikalne komponente strujanja mora i vlastite vertikalne brzine gibanja (ovisno o gradijentu i optimumu svjetlosnog intenziteta), a sve sa ciljem dosezanja i zadržavanja u zoni optimalnog intenziteta svjetlosti. Ova kognitivna komponenta gibanja ličinke predstavlja glavni napredak uspostavljenog „agent-based“ modela u odnosu na klasični pristup s tretmanom pasivnih čestica.

Potrebno je napomenuti da nakon dosezanja postavljenog uvjeta za terminalno stanje ličinke dolazi do prekida njenog horizontalnog gibanja i početka tonjenja ličinke sa usvojenom konstantnom brzinom (postavljeno unutar numeričkog modela, objašnjeno u sljedećem poglavlju).

## 2.4. Uspostava ABM i provedba simulacija

ABM simulacije kojima se opisuju ponašanja individualizirane jedinke nemaju ograničenje primjene samo na ekologiju (DeAngelis i Mooij, 2005.; Grimm i Railsback, 2005.), već nalaze primjenu i u drugim disciplinama koje se bave kompleksnim sustavima autonomnih entiteta. ABM modeli omogućavaju istraživanje razvoja sustava kao posljedice adaptabilnog ponašanja jedinki, kao i kako se promjene karakteristike

sustava odražavaju na egzistenciju jedinke (Strand i sur., 2002.). Potencijal ABM simulacija ima i svoja ograničenja, primarno vezana uz mogućnosti računalnih tehnologija i resursa, a sekundarno kroz otežano interpretiranje primijenjenog modelskog koncepta i polučeni rezultata simulacija (Hales i sur., 2003.).

Simulacije ABM-a moguće je provoditi „offline“ na podlozi prethodno verificiranih rezultata hidrodinamičkog modela. U slučaju velikog broja numeričkih proračunskih čvorova i duljeg simulacijskog razdoblja rezultatne datoteke hidrodinamičkog modela zahtijevaju značajnu raspoloživu memoriju za njihovu pohranu. Primjerice, za simulacijsko razdoblje 12.3.2008. – 13.5.2008. i proračunsku mrežu prikazanu na slici 7, potrebno je približno 10 GB memorije za pohranu rezultata hidrodinamičkog modela i daljnju provedbu ABM „offline“.

Parametri i procesne jednadžbe implementirane u ABM pronosa ličinke uključuju: karakterističnu lokaciju, termin i trajanje njihovog unosa (trenutno upuštanje 600 čestica u terminima 14.3.2008., 22.3.2008., 7.4.2008. i 20.4.2008. na dubini 2 m), koeficijente disperzije (istovjetni kinematskom koeficijentu turbulentne viskoznosti iz hidrodinamičkog modela), brzinu umiranja (eng: mortality) i rasta (eng: growing) morskih ličinki u ovisnosti o temperaturi mora (okolišni parametar), te njihovo vertikalno kretanje u ovisnosti o intenzitetu svjetlosti. Obzirom da interakcijski odnosi između pojedinih ličinki nisu uzeti u obzir, modelski rezultati nisu osjetljivi na izbor broja jedinki, odnosno čestica ličinki. Brzina umiranja  $K_M$  i brzina rasta  $K_G$  morske ličinke su međusobno povezane i pozitivno korelirane sa temperaturom mora. Vrste podložne velikoj brzini umiranja također imaju i veliku brzinu rasta, tako da vrste koje se razvijaju u području niskih latituda, ili sezonsko visokih temperatura, imaju veliku brzinu umiranja, dok ličinke razvijene u hladnom okolišnom mediju imaju manju brzinu umiranja (North i sur., 2009.). Houde i Zastrow (1993.) su izveli empiričke izraze za procjenu mortaliteta (brzine umiranja)  $K_M = 0.0149 + 0.0129 \cdot T$  i brzine rasta  $K_G = 0.0230 + 0.0106 \cdot T$  na bazi temperature mora  $T$  u °C. Ovi izrazi su posebice korisni kad se provode poopćene analize uz odsustvo podataka o konkretno obitavajućim vrstama i njima pripadajućim vrijednostima  $K_M$  i  $K_G$ .

Za brzinu stjecanja kompetencije (eng: competency acquisition rate) i kvalitetu staništa za naseljavanje (eng: habitat quality for settlement) usvojene su konzervativne pretpostavke (Lai i Pedersen, 2016.). To znači da je cjelokupna populacija ličinki potencijalno sposobna za naseljavanje podmorja, te da je cjelokupno područje modelske domene jednako pogodno za naseljavanje. Mortalitet ličinki nakon prekida njihove pelagičke faze i kolonizacije dna nije uzet u obzir.

U nastavku su izložene osnovne jednadžbe procesa prema prethodno navedenom konceptu uspostavljenog ABM-a. Za forsiranje modela pronosa ličinki iz hidrodinamičkog modela preuzimaju se polja horizontalne brzine strujanja mora, vertikalne brzine

strujanja mora, temperature mora i intenziteta svjetla na površini mora.

Uspostavljeni ABM omogućava da se ličinke kreću vertikalno kroz stupac mora sa autonomnim pogonom u potrazi za optimalnom svjetlosti koja je na vremenski varijabilnoj dubini. Pri tome ličinka integrira toplinu okolnog mora sve do postizanja određene veličine, odnosno dosezanja postavljenog praga integrirane topline (terminalno stanje). Nakon toga dolazi do prekida njenog horizontalnog gibanja, odnosno redukcije gibanja samo na tonjenje (naseljavanje dna). Potrebno je napomenuti da usvojena vrijednost integrirane topline nakon koje ličinke prekidaju horizontalno kretanje (terminalno stanje) nije vezana uz konkretnu vrstu ličinke, već je odabrana okvirno na način da ličinke imaju pelagičko razdoblje od približno 7 dana, ovisno o hidrodinamičkim uvjetima.

Primarna varijabla analiziranog procesa ABM je integrirana toplina  $T_{INT}$  a njena promjena izražena je jednadžbom (5):

$$\frac{dT_{INT}}{dt} = K_G - K_M \quad (5)$$

Za proračun lokalnog intenziteta svjetlosti  $I_Z$  uzduž vertikale stupca mora se koristi jednadžba:

$$I_Z = I_0 e^{-\left(\frac{SD}{2.3}\right)Z} \quad (6)$$

gdje je:  $SD$  secchi dubina (usvojena stacionarna i homeogena vrijednost 7.5 m, [tablica 2](#));  $Z$  dubina;  $I_0$  intenzitet svjetla na površini mora.

Lokalni gradijent svjetlosnog intenziteta  $I_{GRAD}$  izračunava se temeljem izraza (7):

$$I_{GRAD} = \frac{I_Z - I_{OPT}}{I_{OPT}} \quad (7)$$

gdje je:  $I_{OPT}$  optimalni svjetlosni intenzitet kojeg ličinke žele dosegnuti (usvojeno 200 W/m<sup>2</sup>).

Relativna brzina vertikalnog gibanja ličinke  $V_{LIC}$  je neovisna o brzini vertikalnog strujanja mora, te izražava kognitivnu težnju ličinke za dosezanjem dubine na kojoj se pojavljuje optimalni intenzitet svjetla  $I_{OPT}$  a proračunava se primjenom sljedeće uvjetne jednadžbe (8ab):

Ako je  $T_{INT} < T_{INT-TER}$  ;

$$V_{LIC} = (I_{GRAD} * V_{TAL}) + \text{MAX}(-V_{TAL}, \text{MIN}(V_{TAL}, \text{RAND2}(0 : V_{TAL}/3))) \quad (8a)$$

Ako je  $T_{INT} \geq T_{INT-TER}$  ;

$$V_{LIC} = V_{TAL} \quad (8b)$$

gdje je:  $T_{INT-TER}$  postavljeni prag integrirane topline (usvojeno 20 °C dan);  $V_{TAL}$  brzina taloženje čestica u mirnoj vodi (usvojeno 0.0025 m/s, Chia i sur. (1984.));  $RAND2$  generirani slučajni broj u zadanom rasponu ( $a:b$ );

Vektor ukupnog vertikalnog pomaka čestice ličinke dobiva se temeljem apsolutne vertikalne brzine ličinke  $V_{LIC-APS}$  proračunate jednadžbom (9):

$$V_{LIC-APS} = V_{LIC} - V_V \quad (9)$$

gdje je:  $V_V$  vertikalna brzina strujanja mora iz hidrodinamičkog modela strujanja.

Odabrani termini unosa ličinki iz broda na vezu ([slika 7](#)) nisu slučajno odabrani, već imaju sljedeće karakteristike:

- simulacija upuštanja 14.3.2008. 9:00 – „srednji“ protok Neretve  $Q = 216 \text{ m}^3/\text{s}$  i „blagi“ vjetar ENE smjera (67’);
- simulacija upuštanja 22.3.2008. 9:00 – „mali“ protok Neretve  $Q = 109 \text{ m}^3/\text{s}$  i „pojačani“ intenzitet vjetra SSW/SW smjera (211’);
- simulacija upuštanja 7.4.2008. 9:00 – „srednji“ protok Neretve  $Q = 340 \text{ m}^3/\text{s}$  i „pojačani“ intenzitet vjetra S smjera (186’);

**Tablica 3:** Srednje vrijednosti protoka Neretve i brzine vjetra za razdoblja od 7 dana, 3 dana i 1 dan nakon termina unosa ličinki (14.3., 22.3., 7.4. i 20.4.2008.)

			PROTOK NERETVE (m <sup>3</sup> /s)			
simulacija	početak simulacije	kraj simulacije	$Q_{SR-7dana}$	$Q_{SR-3dana}$	$Q_{SR-1dan}$	kvalitativna karakterizacija
a	14.3.2008. 9:00	21.3.2008. 9:00	162	177	174	mali
b	22.3.2008. 9:00	29.3.2008. 9:00	114	110	97	mali
c	7.4.2008. 9:00	14.4.2008. 9:00	262	292	269	srednji
d	20.4.2008. 9:00	27.4.2008. 9:00	490	593	654	veliki
			BRZINA VJETRA			
simulacija	početak simulacije	kraj simulacije	$W_{SR-7dana}$	$W_{SR-3dana}$	$W_{SR-1dan}$	kvalitativna karakterizacija
a	14.3.2008. 9:00	21.3.2008. 9:00	2,9	2,6	2,9	slabi
b	22.3.2008. 9:00	29.3.2008. 9:00	3,7	4,9	6,2	pojačani
c	7.4.2008. 9:00	14.4.2008. 9:00	2,7	3,2	3,8	srednji
d	20.4.2008. 9:00	27.4.2008. 9:00	2,9	3,0	2,5	slabi

d) simulacija upuštanja 20.4.2008. 9:00 – „veliki“ protok Neretve  $Q = 340 \text{ m}^3/\text{s}$  i „pojačani“ intenzitet vjetera E smjera (87') (vidi slike 2 i 5). Srednje vrijednosti protoka Neretve i brzine vjetera za razdoblja od 7, 3 i jednog dana nakon navedenih termina unosa ličinki prikazane su u tablici 3.

Ukupno je provedeno 5 numeričkih simulacija, od kojih prve četiri (a,b,c,d) pokrivaju vremensko razdoblje od 7 dana nakon termina unosa čestica ličinke (tablica 3). Petom simulacijom obuhvaćen je scenarij upuštanja 50 čestica u sva 4 termina (ukupno simulacijsko razdoblje 13.3.2008. – 12.5.2008.).

### 3. MODELSKI REZULTATI

Na slikama 8 – 11 prikazana su polja strujanja za površinski sloj mora i prostorna raspodjela čestica ličinki za nekoliko termina nakon njihovog unosa iz broda. Bojom ispune čestice prezentira se njena trenutna dubina, a veličinom čestice ukupna akumulirana toplina. Na slikama je također prikazana i ruža vjetrova za pripadnu situaciju tijekom razdoblja od 7 dana nakon unosa ličinki. Na slici 12 prikazana su polja strujanja za površinski sloj mora i prostorna raspodjela sedimentiranih čestica ličinki za 7 dana nakon termina unosa, te zadnji sat simulacijskog razdoblja (13.5.2008. 3:00), za simulaciju sa upuštanjem čestica u sva 4 termina.

Sa slikama 8 a, 9 a, 10 a i 11 a (12:00 sati, maksimalni intenzitet svjetlosti tijekom dana) prepoznaje se inicijalna vertikalna migracija čestica prema većim dubinama kao posljedica traženja optimalnog intenziteta svjetla na dubini većoj od dubine upuštanja (2 m). Zamiranje svjetlosnog intenziteta kroz naredna tri sata (slike 8 b, 9 b, 10 b i 11 b, 15:00 sati) rezultira promjenom smjera kretanja ličinki prema površini, a koje se dodatno intenzivira prelaskom u kasnije popodneve i večernje sate (slike 8 c d, 9 c d, 10 c d i 11 c d, 18:00 i 21:00 sati). Prelaskom u novi dan, i ponovnim povećanjem intenziteta svjetlosti (slike 8 e f, 9 e f, 10 e f i 11 e f, 9:00 sati), ličinke ponovno vertikalno migriraju u dublje slojeve do dubina na kojima se pojavljuje optimalni intenzitet svjetla (3 – 4 m).

Horizontalni pronos primarno je definiran poljem strujanja koje je rezultat okolišnih uvjeta (protok Neretve, brzina i smjer vjetera, dinamika morskih razli).

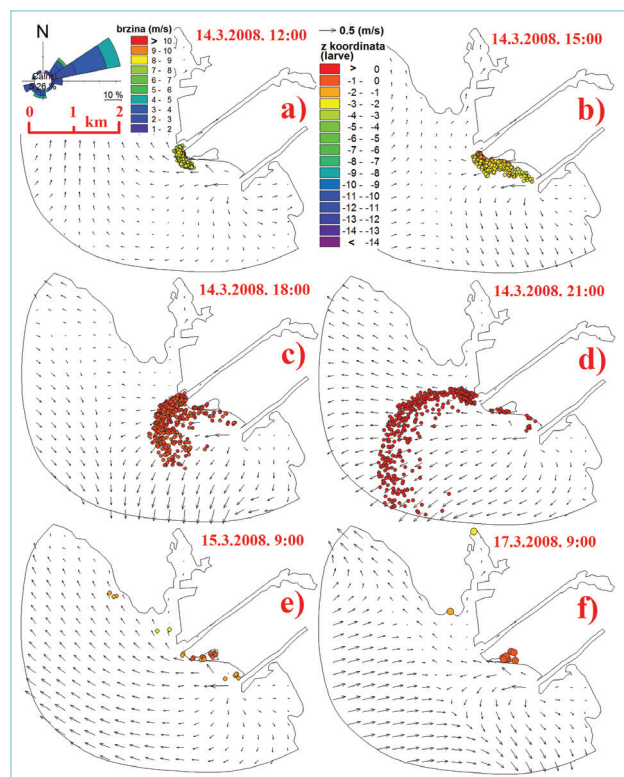
Pojačana brzina vjetera (raspon smjerova S – SW) u kasno popodnevnom i ranovečernjem razdoblju (nizak intenzitet svjetlosti), kada ličinke borave u površinskom sloju mora, rezultira njihovim rapidnim iznošenjem iz modelske domene u smjeru SE (slika 9 c d). Obzirom da je strujanje u površinskom sloju mora kontinuirano brže od strujanja na dubinama od 3 do 5 m, isto se događa i u slučaju slabog vjetera i malog protoka Neretve (slika 8 c d). Povećanje protoka Neretve rezultira debljim slojem izlaznog NW strujanja (slike 10 d e i 11 d e) i pronosa

čestica uzduž obalne crte u smjeru NW. Uvlačenje čestica u kanal koji se pruža u nastavku linije priveza broda iz kojeg se nose čestice pojavljuje se samo kod srednjeg protoka i srednje brzine vjetera iz SSE/S smjera (slika 10 c d i 11 f).

Sa slikama 12 d e se može uočiti da je sedimentacija (naseljavanje) ličinki u zatvorenijem dijelu lučkog akvatorijalnog kompleksa najizraženija u okolišnim uvjetima simulacije 4 (veliki protok Neretve). Na kraju situacije 1 (slika 12 a) samo je jedna lokacija uspješno sedimentirala ličinke na dno, na kraju situacije 2 (slika 12 b) nema dodatno sedimentiranih čestica, a na kraju situacije 3 (slika 12 c) registrirana je još jedna dodatna lokacija uspješno sedimentirane čestice ličinke.

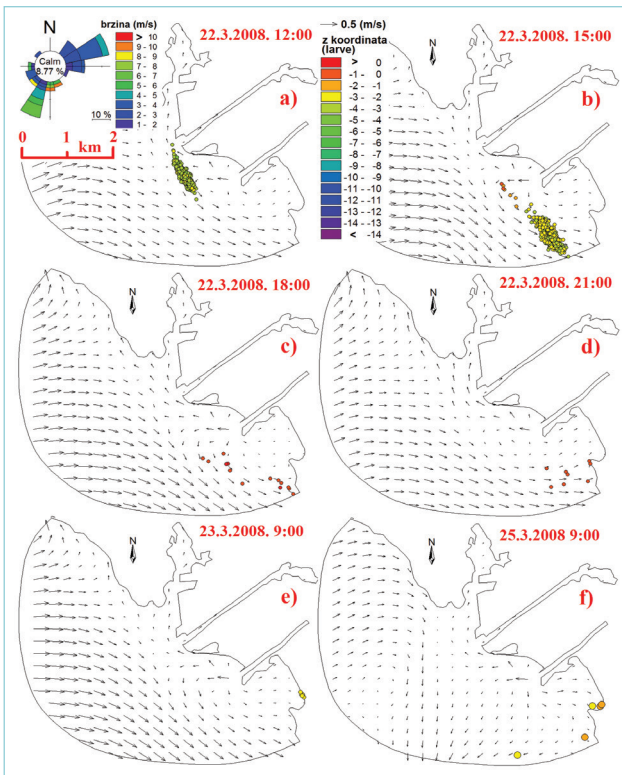
Brzina i smjer vjetera te protok Neretve izrazito su varijabilne sastavnice okolišnih uvjeta koje značajno utječu na pronos ličinki unešenih u površinskom sloju mora. Iako je broj mogućih kombinacija pojavljivanja vjetera određene brzine/smjera i protoka Neretve praktički beskonačan, dobiveni rezultati upućuju na zaključak da veći protok Neretve predstavlja veću opasnost od trajnog naseljavanja površinski unešenih ličinki u zatvorenom dijelu lučkog bazena.

Potrebno je naglasiti da će se vrste koje nemaju mogućnost autonomnog kretanja prema površini, ili se ciljano zadržavaju u pridnenom sloju, intenzivnije zadržavati i/ili akumulirati u lučkom akvatoriju zbog pridnenog kompenzacijskog unosa mora.

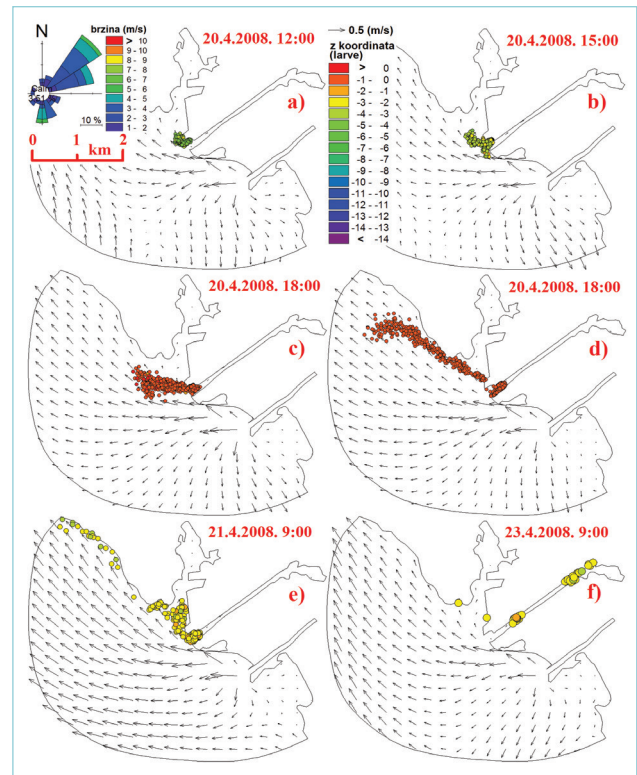


Slika 8: Polja strujanja za površinski sloj mora i prostorna raspodjela čestica ličinki za 3(a), 6(b), 9(c), 12(d), 24(e) i 72(f) sata nakon njihovog unosa iz broda u terminu 14.3.2008. 9:00 (a)) (boja ispune čestice prezentira dubinu na kojoj se čestica nalazi, veličina čestice prezentira ukupnu akumuliranu toplinu)

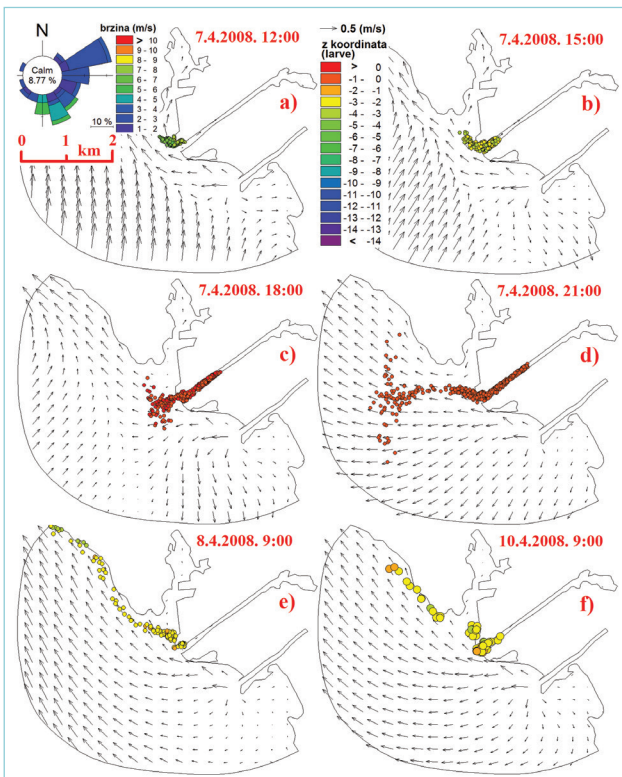




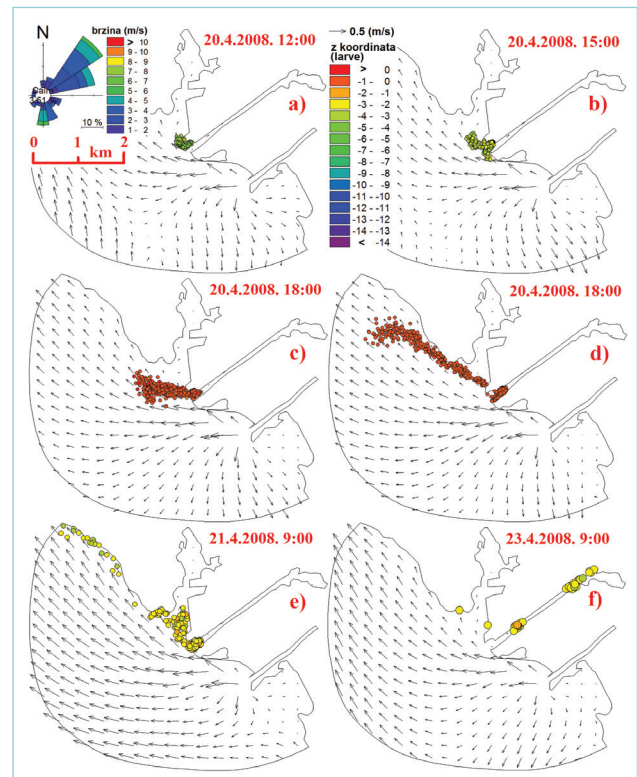
Slika 9: Polja strujanja za površinski sloj mora i prostorna raspodjela čestica ličinki za 3 (a), 6(b), 9(c), 12(d), 24(e) i 72(f) sata nakon njihovog unosa iz broda u terminu 22.3.2008. 9:00 (a)) (boja ispunje čestice prezentira dubinu na kojoj se čestica nalazi, veličina čestice prezentira ukupnu akumuliranu toplinu)



Slika 11: Polja strujanja za površinski sloj mora i prostorna raspodjela čestica ličinki za 3(a), 6(b), 9(c), 12(d), 24(e) i 72(f) sata nakon njihovog unosa iz broda u terminu 20.4.2008. 9:00 (a)) (boja ispunje čestice prezentira dubinu na kojoj se čestica nalazi, veličina čestice prezentira ukupnu akumuliranu toplinu)



Slika 10: Polja strujanja za površinski sloj mora i prostorna raspodjela čestica ličinki za 3 (a), 6(b), 9(c), 12(d), 24(e) i 72(f) sata nakon njihovog unosa iz broda u terminu 07.4.2008. 9:00 (a)) (boja ispunje čestice prezentira dubinu na kojoj se čestica nalazi, veličina čestice prezentira ukupnu akumuliranu toplinu)



Slika 12: Polja strujanja za površinski sloj mora i prostorna raspodjela sedimentiranih čestica ličinki za 7 dana nakon termina unosa (21.3.2008. 9:00 (a), 29.3.2008. 9:00 (b), 14.4.2008. 9:00 (c), 27. 4. 2008. 9:00 (d)), te zadnji sat simulacijskog razdoblja (13.5.2008. 3:00 (e)), za simulaciju sa upuštanjem čestica u sva 4 termina (14.3.2008. 9:00, 22.3.2008. 9:00, 7.4.2008. 9:00, 20.4.2008. 9:00) (boja ispunje čestice prezentira akumuliranu toplinu)

#### 4. ZAKLJUČAK

Primijenjen je 3D hidrodinamički numerički model s kojim su proračunata polja brzine strujanja i prostorne raspodjele temperature mora, saliniteta mora i intenziteta svjetlosti u akvatoriju ušća Neretve za razdoblje 12.3.2008.-10.5.2008. Forsiranje modela na otvorenim granicama i na kontaktu s atmosferom ostvareno je primjenom satne dinamike morskih razina, trosatne dinamike polja brzine vjetra i polusatne dinamike protoka i temperature rijeke Neretve. Rezultati hidrodinamičkog modela korišteni su za implementaciju uspostavljenog „agent based“ modela pronosa diskretnih čestica ličinke. Čestice ličinke unesene su na jednoj poziciji broda na vezu u luci Ploče pri izmjeni balastnih voda u 4 termina (14.3, 22.3., 7.4. i 20.4.2008.).

Osnovna procesna varijabla u ABM pronosa ličinki interpretirana je kao integralna toplina koju čestica ličinke akumulira do određene krajnje vrijednosti, nakon čega se prekida njen pronos u horizontalnom smjeru te nastupa faza kontinuiranog tonjenja ka dnu. Tijekom boravka u pelagijalu brzina rasta i umiranja ličinke vezana je na lokalnu temperaturu mora, a ličinke ostvaruju stratešku vertikalnu migraciju s ciljem dolaska u zonu optimalnog intenziteta svjetlosti.

Rezultati provedenih simulacija pokazali su da veći protok Neretve, uz istovremenu pojavu slabog vjetra

iz smjerova u rasponu S-SW, pospješuje sedimentaciju ličinki u zatvorenijim dijelovima lučkog bazena. Nasuprot tome, manji protok Neretve i veća brzina vjetra osiguravaju uvjete za odnošenje ličinki u SE smjeru pružanja Neretljanskog kanala.

Ukoliko bi se u istim okolišnim uvjetima unijele neke druge vrste, koje nemaju mogućnost autonomnog kretanja prema površini (izraženije tonjenje), ili imaju ciljano zadržavanje u pridnom sloju, njihova akumulacija u lučkom akvatoriju bila bi znatno izraženija uslijed pridnog kompenzacijskog unosa mora.

Neretva je uzvodno regulirana pa se uspostavom komunikacije sa nadležnim tijelima u BiH mogu izmijenjivati informacije o planiranim protocima u kraćem nadolazećem razdoblju. Primjena tih informacija može poslužiti za nadogradnju sustava ranog uzbunjivanja od pojave unašanja i zadržavanja invazivnih vrsta.

Ukoliko se raspolaže s pouzdanom procjenom očekivanih promjena parametara forsiranja modela, primjerice promjene morskih razina uslijed klimatoloških promjena ili promjene regulacije rijeke Neretve za potrebe korištenja vodnih snaga, ovakva sprega hidrodinamičkog i ABM modela može poslužiti kao alternativa statističkim modelima u domeni donošenja strateških odluka. ■

#### 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, 630 str.
- Arnold, W.S.; Hitchcock, G.L.; Frischer, M.E.; Wanninkhof, R.; Sheng, Y.P. (2005.): Dispersal of an introduced larval cohort in a coastal lagoon. *Limnology and Oceanography*, 50, str. 587–597.
- Bartolić, I.; Lončar, G.; Bujak, D.; Carević, D. (2018.): The Flow Generator Relations for Water Renewal through the Flushing Culverts in Marinas, *Water*, 10 (7), 22 str.
- Cardeccia, A.; Marchini, A.; Occhipinti-Ambrogi, A.; Galil, B.S.; Gollasch, S.; Minchin, D.; Narscius, A.; Olenin, S.; Ojaveer, H. (2016.): Assessing biological invasions in European seas: biological traits of the most widespread non-indigenous species, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 201, str. 17–28.
- Catford, J.A.; Vesik, P.A.; Richardson, D.M.; Pyšek, P. (2012.): Quantifying levels of biological invasion: towards the objective classification of invaded and invulnerable ecosystems, *Glob. Chang. Biol.*, 18, str. 44–62.
- Chia, F.S.; Buckland-Nicks J.; Young, C.M. (1984.): Locomotion of marine invertebrate larvae: a review. *Canadian Journal of Zoology*, 62, str. 1205–1222.
- Chen, W.; Chen, K.; Kuang, C.; Zhu, D.Z.; He, L.; Mao, X.; Liang, H.; Song, H. (2016.): Influence of sea level rise on saline water intrusion in the Yangtze River Estuary – China, *Applied Ocean Research*, 54, str.12–25.
- Colby, D.R. (1988.): Null hypotheses, models, and statistical designs in the study of larval transport, *American Fisheries Society Symposium* 3, str. 149–162.
- DeAngelis, D.L.; Mooij, W.M. (2005.): Individual-based modeling of ecological and evolutionary processes, *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 36, str. 147–168.
- DiBacco, C.; Sutton, D.; and McConnico, L. (2001.): Vertical migration behavior and horizontal distribution of brachyuran larvae in a low-inflow estuary Implications for bay-ocean exchange. *Marine Ecology Progress Series*, 217, str. 191–206.
- Epstein, J. M. (2007.): *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*. Princeton University Press, Princeton, NJ., 352 str.
- Federalni hidrometeorološki zavod BIH: Hidrološki godišnjaci za razdoblje 2004.-2012. (<http://www.fhmzbih.gov.ba/latinica/P-hidro.php>)
- Gardiner, C.W. (1985.): *Handbook of stochastic methods for Physics Chemistry and Natural Science*, Springer-Verlag, Berlin, 409 str.
- Gerlach, G. J.; Atema, M.J.; Kingsford, K.P.; Black, Miller-Sims, V. (2007.): Smelling home can prevent dispersal of reef fish larvae, *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America*, 104, str. 858–863.
- GFZ (2009.): Vertikalni profili temperature i saliniteta mora u akvatoriju Neretljanskog kanala (preuzeto iz „Program praćenja stanja Jadranskog mora, GFZ – vodeći partner“).

- Grimm, V.; Railsback, S.F. (2005.): *Individual-Based Modeling and Ecology*, Princeton University Press, Princeton, NJ., 448 str.
- Hales, D.; Rouchier, J.; Edmonds, B. (2003): Model-to-model analysis, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(4), 5. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/4/5.html>
- Hare, J.A.; Churchill, J.H.; Cowen, R.K.; Berger, T.J.; Cornillon, P.C.; Dragos, P.; Glenn, S.M.; Govoni, J.J.; Lee, T.N. (2002.): Routes and rates of larval fish transport from the southeast to the northeast United States continental shelf, *Limnology and Oceanography*, 47(1), str. 774–789.
- He, W.; Zhang, J.; Yu, X.; Chen, S.; Luo, J. (2018.): Effect of runoff variability and sea level on saltwater intrusion: a case study of Nandu River Estuary – China, *Water Resources Research*, 54(12), str. 9919–9934.
- HHI (2003.): Izvješće o mjerenjima na mareografskoj postaji u razdoblju od ožujka 2002. do ožujka 2003. godine, 2003.
- Houde, E.D. (1989.): Comparative growth, mortality, and energetics of marine fish larvae: Temperature and implied latitudinal effects. *Fishery Bulletin*, 87(3), str. 471–495.
- Houde, E.D.; Zastrow, C.E. (1993.): Ecosystem- and taxon-specific dynamic and energetics properties of larval fish assemblages, *Bulletin of Marine Science*, 53, str. 290 – 335.
- Hwang, J.H.; Jang, D.; Kim, Y.H. (2017.): Stratification and salt-wedge in the Seomjin river estuary under the idealized tidal influence, *Ocean Science Journal*, 52(4), str. 469–487.
- IMO, 2004. International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments. 13. *International Maritime Organization*, London, UK, 36 str.
- IMO, 2005. Guidelines for Ballast Water Management and Development of Ballast Water Management Plan (G4). Marine Environment Protection Committee, Resolution
- MEPC. Vol. 127 (53) *International Maritime Organization*, London, UK 22 July 2005. 16 str.
- IOR (2013.): *The Adriatic Sea Monitoring Program, 2nd phase – Monitoring implementation efficiency review report (MIERR)*, 420 str.
- Jorgensen, S.; Bendoricchio, G. (2001.): *Fundamentals of ecological modelling*, Elsevier-academic press, 530 str.
- Katsanevakis, S.; Zenetos, A.; Belchior, C.; Cardoso, A.C. (2013.): Invading European seas: assessing pathways of introduction of marine aliens., *Ocean Coast. Manag.*, 76, str. 64–74.
- Kloeden, P.E.; Platen, E. (1999): *Numerical Solution of Stochastic Differential Equations*, Springer-Verlag, Berlin, 636 str.
- Kraus, R.; Grilli, F.; Supić, N.; Janeković, I.; Brailo, M.; Cara, M.; Bratoš Cetinić, A.; Campanelli, A.; Cozzi, S.; D'Adamo, R.; Djakovac, T.; Dutour-Sikirić, M.; Flander Putrle, V.; Francé, J.; Joksimović, D.; Klun, K.; Kolitari, J.; Kralj, M.; Kušpilić, G.; Marini, M.; Matic, F.; Mikus, J.; Ninčević-Gladan, Ž.; Pansera, M.; Pećarević, M.; Precali, R.; Prusina, I.; Relitti, F.; Santucci, A.; Specchiulli, A.; Škalic, D. (2019a.): Oceanographic characteristics of the Adriatic Sea – support to secondary HAOP spread through natural dispersal. *Marine Pollution Bulletin*, 147, str. 59–85.
- Kraus, R.; Ninčević-Gladan, Ž.; Auriemma, R.; Bastianini, M.; Bolognini, L.; Cabrini, M.; Cara, M.; Čalić, M.; Campanelli, A.; Cvitković, I.; Despalatović, M.; Dragičević, B.; Drakulović, D.; Dulčić, J.; Flander-Putrle, V.; Grati, F.; Grego, M.; Grilli, F.; Jaklin, A.; Janeković, I.; Kolitari, J.; Lipej, L.; Magaletti, E.; Marini, M.; Matic-Skoko, S.; Mavrić, B.; Mikuš, J.; Mozetič, P.; Orlando-Bonaca, M.; Petović, S.; Precali, R.; Supić, N.; Trabucco, B.; Travizi, A.; Žuljević, A. (2019.b.): Strategy of port baseline surveys (PBS) in the Adriatic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 147, str. 47–58.
- Lai, C.; Pedersen, C. (2016.): Agent based modelling as a tool to manage dredging impact on coral spawning, Proceedings of the 13th International Coral Reef Symposium, Honolulu, str. 380–393.
- Lončar, G.; Paladin, M.; Matošević, J. (2013.): Numerička analiza utjecaja vjetra na intenzitet cvjetanja mora na području sjevernog Jadrana, *Hrvatske vode*, 21 (84), str. 109–118.
- Lončar, G.; Paladin, M.; Matošević, J. (2013.): Numerička analiza djelovanja brane na sprječavanje prodora slane vode duž korita rijeke Neretve, *Hrvatske vode*, 28 (112), str. 113–124.
- Macal, C.M.; North, M.J. (2010.): Tutorial on agent-based modelling and simulation, *Journal of Simulation*, 4(3), str. 151–162
- Magaletti, E.; Garaventa, F.; David, M.; Castriota, L.; Kraus, R.; Luna G.M.; Silvestri, C.; Forte, C.; Bastianini, M.; Falautano, M.; Maggio, T.; Rak, G.; Gollasch, S. (2018.): Developing and testing an Early Warning System for Non Indigenous Species and Ballast Water Management. *Journal of Sea Research*, 133, str. 100–111.
- McCormick, M.I. (2006.): Mothers matter: Crowding leads to stressed mothers and smaller offspring in marine fish, *Ecology*, 87(5), str. 104–109.
- North, E. W.; Gallego, A.; Petitgas, P. (2009.): *Manual of recommended practices for modelling physical – biological interactions during fish early life*, ICES Cooperative Research Report No. 295. 111 str.
- Ojaveer, H.; Galil, B.S.; Minchin, D.; Olenin, S.; Amorim, A.; Canning-Clode, J.; Chaiho, P.; Copp, G.H.; Gollasch, S.; Jelmert, A.; Lehtiniemi, M.; McKenzie, C.; Mikuš, J.; Miossec, L.; Occhipinti-Ambrogi, A.; Pećarević, M.; Pederson, J.; Quilez-Badia, G.; Wijsman, J.W.M.; Zenetos, A. (2014.): Ten recommendations for advancing the assessment and management of non-indigenous species in marine ecosystems. *Marine Policy* 44:160–165.
- Rodi, W. (1987.): Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids, *Journal of Geophysical Research*, 92, (C5), str. 5305–5328.
- Scotti, A.; Pineda, J. (2007.): Plankton accumulation and transport in propagating nonlinear internal fronts, *Journal of Marine Research*, 65, str. 117–145.
- Shaha, D.C.; Cho, Y.K.; Kim, T.W. (2013.): Effects of river discharge and tide driven sea level variation on saltwater intrusion in Sumjin River estuary: an

- application of finite-volume coastal ocean model, *Journal of Coastal Research*, 29 (2), str. 460-470.
- Smagorinsky, J. (1993.): *Some historical remarks on the use of nonlinear viscosities*, In: Large eddy simulations of complex engineering and geophysical flows, B. Galperin and S. Orszag (eds.), Cambridge University Press, str. 1-34.
- Sponaugle, S., Grorud-Colvert, K. (2006.): Environmental variability, early life-history traits, and survival of new coral reef fish recruits. *Integrative and Comparative Biology*, 46, str. 623-633.
- Strand, E.; Huse, G.; Giske, J. (2002.): Artificial evolution of life history and behavior, *Am. Nat.*, 159, str. 624-644.
- Verity, P.G.; Smetacek, V. (1996.): Organism life cycles, predation, and structure of marine pelagic ecosystems. *Marine Ecology Progress Series* 130, 277-293.
- Woods, L.; Hargis, W.J. (1971.): Transport of bivalve larvae in a tidal estuary, in *Fourth European Marine Biology Symposium*, D.J. Crisp, ed., Cambridge University Press, str. 29-44.
- Yuan, R.; Zhu, J.; Wang, B. (2015.): Impact of sea-level rise on saltwater intrusion in the Pearl River Estuary, *Journal of Coastal Research*, 31(2), str. 477-487.
- Wu, J. (1994.): *The sea surface is aerodynamically rough even under light winds*, *Boundary layer Meteorology*, 69, str. 149-158.

### Analysis of larvae transport from ballast water in the Port of Ploče

**Abstract.** A 3D numerical model of sea circulation and transport of larvae introduced at a fixed position of the port terminal due to discharges of ballast water from ship tanks for the Port of Ploče waters was established. The model larvae particles are not passive but have sensory capacity to recognize environmental conditions and cognitive reaction regarding direction change and their movement intensity (ABM, agent based model) in view of optimal light intensity and sea temperature. The model simulations were conducted for a period from 12.3.2008 to 10.5.2008, using the measured discharges and temperatures of the Neretva River at the station Žitomisljci (half-hour resolution), model results of wind speed and direction from the numerical model Aladin-Hr (three-hour resolution), hourly dynamics of sea levels and measured vertical distribution of sea temperatures and salinity at the open boundary of the model (CTD probe). The larvae particles were introduced at 4 dates (14.3., 22.3., 7.4. and 20.4.2008), at the start of situations with a registered characteristic combination of environmental conditions ("low" or "high" discharges of the Neretva with "low" or "high" wind speeds from the ENE, SW, S and E directions). The results of conducted simulations indicate that in a situation of higher Neretva discharges and lower wind speeds (on average in 7 dana after the larvae introduction  $QSR-7days = 490 \text{ m}^3/s$  and  $WSR-7days = 2.9 \text{ m/s}$ ), the most pronounced larvae sedimentation occurs in the closed part of the port basin. On the other hand, in case of lower Neretva discharges and higher wind speeds ( $QSR-7days = 114 \text{ m}^3/s$  and  $WSR-7days = 3.7 \text{ m/s}$  in the S-SW direction range), the larvae are intensely transported in the SE direction of the Neretva channel.

**Key words:** Port of Ploče, ballast water, larvae, ABM model

### Analyse des Larventransportes aus dem Ballastwasser im Hafengebiet Ploče

**Zusammenfassung.** Für das Wassergebiet des Hafens Ploče wurde ein dreidimensionales numerisches Modell der Meereszirkulation und des Transportes von Larven erstellt, die an einem bestimmten Ort am Hafenterminal nach der Entleerung von Ballastwassertanks ins Meer eingeleitet werden. Die Modellpartikeln von Larven sind nicht passiv, sondern sie haben eine Sensorfähigkeit zur Wahrnehmung von Umweltbedingungen und eine kognitive Reaktion im Sinne der Änderung von Bewegungsrichtung und Bewegungsintensität (agentenbasiertes Modell; Engl. ABM – agent-based model) in der Richtung der optimalen Lichtintensität und Meerestemperatur. Die Modellsimulationen wurden für den Zeitraum zwischen 12. März 2008 und 10. Mai 2008 durchgeführt unter Anwendung des gemessenen Durchflusses und Temperatur des Flusses Neretva auf der Station Žitomisljci (halbstündige Auflösung), der Modellergebnisse für Windgeschwindigkeit und Windrichtung aus dem numerischen Modell Aladin-Hr (dreistündige Auflösung), der einstündigen Dynamik von Meeresebenen sowie der gemessenen vertikalen Temperaturverteilung und Salinität an den offenen Modellrändern (die CTD-Rosette). Die Larvenpartikeln wurden an vier Terminen (14. März, 22. März, 7. April und 20. April 2008) eingeleitet, am Anfang von Situationen mit der registrierten charakteristischen Kombination von Umweltbedingungen (Kombinationen vom kleinen oder großen Durchfluss vom Fluss Neretva mit niedriger oder erhöhter Windgeschwindigkeit aus den Richtungen ONO, SW, S und O). Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen zeigen, dass in der Situation eines größeren Durchflusses von Neretva ( $Q = 490 \text{ m}^3/s$ ) und niedrigerer Windgeschwindigkeit ( $W = 2.9 \text{ m/s}$ ) durchschnittlich sieben Tage nach der Einleitung von Larven zur ausgeprägtesten Bildung vom Larvensediment im geschlossenen Teil des Hafengebietes kommt. Andererseits werden in der Situation eines kleineren Durchflusses von Neretva ( $Q_{SR} = 114 \text{ m}^3/s$ ) und erhöhter Windgeschwindigkeit ( $W = 3.7 \text{ m/s}$ ) im Windrichtungsbereich S-SW die Larven intensiv entlang des Neretva-Kanals in der südöstlichen Richtung transportiert.

**Schlüsselwörter:** Hafen Ploče, Ballastwasser, agentenbasiertes Modell