

# Mogućnosti primjene modela zasnovanih na agentima u hidraulici okolišnoga inženjerstva

---

Kulić, Tin; Lončar, Goran

*Source / Izvornik:* **Zajednički temelji 2023. - uniSTem : deseti skup mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti, Split, 14.-17. rujna, 2023. : zbornik radova, 2023, 26 - 31**

**Conference paper / Rad u zborniku**

*Publication status / Verzija rada:* **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.06>

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:789619>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-26**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)





<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.06>

## MOGUĆNOSTI PRIMJENE MODELA ZASNOVANIH NA AGENTIMA U HIDRAULICI OKOLIŠNOGA INŽENJERSTVA

Tin Kulić<sup>1</sup>, Goran Lončar<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Fra Andrije Kačića Miošića 26, Zagreb,  
[tin.kulic@grad.unizg.hr](mailto:tin.kulic@grad.unizg.hr), [goran.loncar@grad.unizg.hr](mailto:goran.loncar@grad.unizg.hr)

### Sažetak

Svjedoci smo izraženog napretka na polju razvoja softvera i računalnih komponenti koji se koriste pri izradi numeričkih modela i simulacija raznih prirodnih procesa i promjena u ekosustavima. Konvencionalne metode modeliranja često ne uzimaju u obzir određena stanja sustava koja proizlaze kao posljedica procesa nastalih prilikom interakcije njegovih dionika. Upravo se modeliranje zasnovano na agentima (eng. *Agent-based modelling*, ABM) ističe kao pristup modeliranju sustava na razini jedinice (agenti) i makroskopskoj razini na koju značajno utječu opisane interakcije s agentima. Ovaj rad daje pregled područja primjene ABM-a pri čemu je fokus stavljen na okolišno inženjerstvo i s njim povezanu hidrotehničku problematiku. Kroz same primjere pokušat će se približiti mogućnosti korištenja ABM-a kao pristupa modeliranju koji može nadograditi konvencionalne metode modeliranja te doprinijeti razvoju sektora građevinarstva.

*Ključne riječi: okolišno inženjerstvo, hidrotehnika, modeliranje zasnovano na agentima*

## THE POSSIBILITIES OF THE APPLICATION OF AGENT-BASED MODELS IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING HYDRAULICS

### Abstract

Nowadays, we are witnessing a continuous evolution of software modules as well as computational components used to build numerical models to simulate various natural processes and changes in ecosystems. Conventional modelling techniques usually do not take into account certain system states resulting from the processes stimulated by the interactions between its stakeholders. Agent-based modelling (ABM) is a modelling approach that considers individual (agents) and macroscopic (environment) levels of the system, the latter being influenced by the interactions with the agents. This paper will give an overview of the different applications of ABM, using water-related problems in environmental engineering as an example. The authors will attempt to illustrate the possibilities of ABM applications through several examples to show how such models can enhance conventional modelling methods and contribute to civil engineering.

*Keywords: environmental engineering, water science, agent-based modelling*

## 1. Uvod

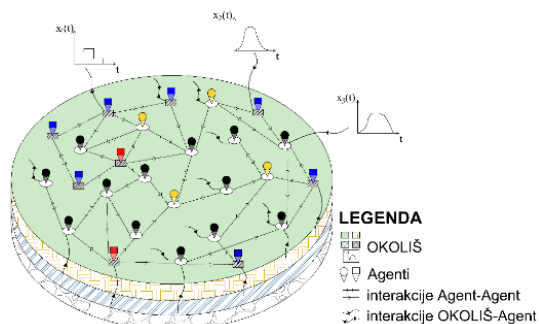
Kontinuirani razvoj softverskih alata i računalnih komponenti daje nam mogućnost analize sve kompleksnijih problema koji se tiču različitih područja znanosti i industrije. Pri tome, valja istaknuti pojam interdisciplinarnosti koji podrazumijeva sagledavanje problematike sa stajališta više struka te donošenja najpovoljnijega jedinstvenog ili, pak, varijantnih rješenja. Upravo pri analizi raznovrsne problematike, osobito u okolišnom inženjerstvu, primjenjuju se matematički modeli kao alati kojima se približno opisuju pojave, procesi i karakteristike određenog sustava rješavanjem matematičkih jednadžbi. Što se, pak, samih matematičkih modela tiče, ovaj će se rad baviti upravo jednom vrstom stohastičkog modela u okviru kojeg rješenje razmatranih procesa i promjena u sustavu nije jedinstveno, već je moguće odrediti vjerojatnosti pojave novih stanja sustava [1].

U kontekstu prethodno diskutiranoga modeliranje zasnovano na agentima (eng. *Agent-based modelling*, dalje u tekstu: ABM) ističe se kao pristup modeliranju sustava koji se sastoje od autonomnih i interaktivnih agenata. ABM omogućuje modeliranje dinamike kompleksnih adaptabilnih sustava u okviru kojih se promatraju posljedice ponašanja i interakcije agenata [2], [3]. Sama definicija ABM-a upućuje na to da je ovaj pristup primjenjiv u svakoj problematici u kojoj je izražen stohastički karakter vladajućih procesa. Abar i sur. [4] dali su iscrpni pregled područja primjene ABM-a kao i odgovarajuće softverske podrške. Datta i sur. [5] te Hoertel i sur. [6] proveli su analizu utjecaja primjene mjera protiv širenja COVID-19 virusa na povećanje broja zaraženih ljudi i njihove hospitalizacije. U navedenim su radovima prikazane studije slučaja na realnim primjerima širenja pandemije u New Yorku i Francuskoj. Nadalje, ABM je svoju primjenu pronašao i u analizi burzovnoga tržišta, tržišta rada te druge ekonomske problematike [7], [8], zatim prometnoga toka i procjene vremena putovanja [9], kombinacije različitih vrsta prometa u okviru sustava za potporu pri odlučivanju vezanog za planiranje vrste transporta [10]. Razvidno je da ABM pronalazi svoju primjenu u raznovrsnim industrijskim i znanstvenim područjima što dovodi, u konačnici, do problematike koja se tiče ovoga rada, a odnosi se na okolišno inženjerstvo. Sam pojam okolišnog inženjerstva obuhvaća široki spektar struka, dok je ovdje fokus na hidrotehničkoj problematici. Osim primjera primjene ABM-a u okviru okolišnoga inženjerstva, ovim će se radom dati uvid u opće značajke ABM-a te prednosti koje donosi integracija ABM-a s hidrodinamičkim (dalje u tekstu: HD) modelima.

## 2. Modeliranje zasnovano na agentima – ABM

### 2.1. Elementi ABM-a

Svaki ABM sastoji se od tri elementa: agenata, okoliša i interakcija na relaciji agent-okoliš i agent-agent [2], [3], [11]. Shematski prikaz strukture ABM-a dan je grafički u nastavku pri čemu je odgovarajućim simbolom označen pojedini element.



**Slika 1.** Shematski prikaz strukture ABM-a (prilagođeno prema [12])

Radovi Grimma i sur. [2], Macala i Northa [3] te Epsteina [11] daju detaljan opis pojedinog elementa ABM-a od čega su u nastavku izdvojene najbitnije značajke. Prvi element odnosi se na skup analiziranih agenata koji su autonomni uzimajući u obzir druge entitete koji se nalaze unutar simuliranog okoliša. Drugi element odnosi se na simulirani okoliš unutar kojeg se nalaze agenti te se odvijaju određene pojave definirane dvama tipovima interakcija – agent-okoliš, agent-agent. Okoliš mogu činiti određeni resursi, pasivni objekti ili nekakva globalna svojstva sustava koji se modelira. Potrebno je posebnu pozornost posvetiti modeliranju okoliša s obzirom na to da nam pouzdanost ABM-a ovisi upravo o pouzdanosti ovoga elementa, odnosno procesa koji ga opisuju te direktno utječu na promjene u gibanju i/ili ponašanju agenata. Posljednji, treći element, odnosi se na opisivanje međusobne interakcije agenata te agenata i okoliša u kojem se nalaze. Ovaj je element definiran određenim matematičkim jednadžbama i logičkim formulacijama.

## 2.2. Primjena ABM-a u hidraulici okolišnoga inženjerstva

U sklopu ovoga poglavlja dat će se uvid u dosad razvijene ABM-ove vezane uz analizu ponašanja i kretanja organizama u HD okruženju. Pri tome, primjerima će se obuhvatiti uspostavljeni ABM-ovi sustava u kojima agenti predstavljaju ili živi svijet, ili objekte. Također, ukratko će se opisati primjeri izvornih ABM-a koje su razvili autori ovoga rada [13], [14].

U okviru primjene ABM-a za potrebe modeliranja pronosa mikroorganizama, poput planktonskih zajednica i ličinki, uobičajeno je korištenje principa superjedinke (eng. *superindividual*) pri opisu njihovoga gibanja i drugih vladajućih procesa u modeliranome ekosustavu koji na njih utječu. Ovaj princip u obzir uzima jednu modelsku česticu koja predstavlja veći broj jedinki čiji su obrasci ponašanja sadržani upravo u matematičkoj formulaciji superjedinke [15]. U recentnim je radovima [16], [17], [18] pronos spomenutih mikroorganizama češće promatran prema principu pasivnih Lagrangeovih čestica, odnosno modelskih čestica čije je gibanje isključivo inducirano okolnim poljem strujanja fluida uz mogućnost vlastitoga tonjenja. Dakako, postoje istraživanja gdje je gibanje fitoplanktona promatran kroz princip aktivnih Lagrangeovih čestica, tj. modelskih čestica koje imaju sposobnost prilagođavanja promjenama u svome okolišu te suprotstavljanja okolnim djelovanjima poput struja fluida i gibanja u željenom smjeru [19]. Prijašnja su pak terenska uzorkovanja i istraživanja ovih vrsta u laboratorijskim uvjetima ukazala na izražene mogućnosti vertikalnoga gibanja jedinki planktonskih zajednica i ličinki s izraženim

bihavioralnim odgovorima na okolišne podražaje [20], [21], [22], [23]. Sukladno tome, Lončar i sur. [14] izradili su združeni HD model cirkulacije mora u akvatoriju luke Ploče i ABM pronosa ličinki. Ličinke (agenti) su modelirane kao aktivne čestice sa sposobnošću vertikalnoga plivanja u ovisnosti o prodoru intenziteta svjetlosti u stupac mora. Osim toga, definiran je set jednadžbi (interakcije na relaciji agent-okoliš, vidi poglavlje 2.1) na temelju kojih modelska čestica ostvaruje uvjete za naseljavanje dna u trenutku akumuliranja optimalne količine unutrašnje topline. U kontekstu ovoga ABM-a okoliš je predstavljen rezultatima HD modela i intenzitetom sunčeve svjetlosti na površini mora. Valja spomenuti i ProtectAS projekt [24] u okviru kojega je provedena analiza dinamike širenja planktonskih zajednica primjenom združenoga HD modela cirkulacije i ABM-a gibanja planktona u lukama Ploče i Rijeka.

ABM svoju primjenu pronalazi pri modeliranju gibanja kompleksnijih organizama poput riba pa će se u nastavku dati opis izvornog modela koji su razvili Kulić i sur. [14]. U istome su radu navedeni dosad razvijeni ABM-ovi koji se tiču tematike migracija i ponašanja riba izloženih HD utjecajima, stoga se neće detaljno obraditi u okviru ovoga rada. Izvorni ABM plivanja ribe uspostavljen je sa svrhom analize konfiguracija riblje staze s vertikalnim otvorima te odabira povoljnije s aspekta ostvarenja takvih uvjeta tečenja da dođe do što manjeg utroška energije agenta (ribe) pri uzvodnoj migraciji. Interakcije na relaciji agent-okoliš opisane su matematičkim jednadžbama pomoću kojih modelska čestica raspoznaje okolno polje strujanja (okoliš dobiven kalibriranim HD modelom) te mu se prilagođava kako bi što manje trošila energiju tijekom gibanja. Pod pojmom prilagodbe struji toka misli se na raspoznavanje smjera strujanja te promjenjivu brzinu gibanja agenta s obzirom na brzinu toka.

Posljednja kategorija primjera primjene ABM-a u okolišnom inženjerstvu odnosi se na modeliranje ljudi i kućanstava kao agenata izloženih djelovanju poplava. ABM je primijenjen za potrebe analize problematike evakuacije ljudi pri pojavi urbanih poplava [25]. Ovim je istraživanjem uključena komponenta ljudskoga faktora u modelsku formulaciju na temelju realnih snimki s nadzornih kamera pri čemu su izvučeni neki od obrazaca ponašanja poput grupiranja ili, pak, tendencije zadržavanja u blizini čvrstih predmeta. Nadalje, slična je tematika obrađena primjenom ABM-a pri analizi evakuacije ljudi uslijed pojave tsunamija [26]. Posljednji izdvojeni primjer odnosi se na istraživanje Yanga i sur. [27] koji su primijenili ABM u sklopu analize osjetljivosti kućanstava (agenata) na urbane poplave.

### **3. Zaključak**

ABM predstavlja relativno nov modelski pristup koji se primjenjuje za potrebe modeliranja dinamike kompleksnih adaptabilnih sustava pomoću autonomnih i interaktivnih agenata. Ovaj modelski pristup ima široki spektar primjene, a upravo je ovim radom dan pregled područja znanosti i realnoga sektora u kojima je moguća njegova primjena. Fokus rada stavljen je na primjenu ABM-a u okolišnom inženjerstvu s naglaskom na hidrotehničku problematiku uz opis primjera analize širenja planktonskih zajednica i ličinki, plivanja riba kroz riblje staze te ponašanja čovjeka izloženoga djelovanju poplava. Uzimajući u obzir činjenicu da se sve više poštuje načelo interdisciplinarnosti, što podrazumijeva uključivanje raznih struka u probleme vezanih uz građevinarstvo, ABM svakako predstavlja alat koji može nadograditi konvencionalne metode modeliranja i doprinijeti razvoju ovoga sektora.

**Zahvala:** Ovo istraživanje financirano je iz sredstava projekta Hrvatske zaklade za znanost (DOK-2020-01) i projekta ProtectAS (KK 05.1.1.02.0013).

## **Literatura**

- [1] Prirodoslovno matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu – Stohastičko modeliranje, <http://aktuari.math.pmf.unizg.hr/docs/sm.pdf>, 26.06.2023.
- [2] Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D.L., Polhill, J.G., Giske, J., Railsback, S.F.: The ODD protocol: A review and first update, *Ecological Modelling*, 221, pp. 2760-2768, 2005, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019
- [3] Macal, C.M., North, M.J.: Tutorial on agent-based modelling and simulation, *Journal of Simulation*, 4(3), pp. 151 – 162, 2010, doi: 10.1057/jos.2010.3
- [4] Abar, S., Theodoropoulos, G.K., Lemarinier, P., O'Hare, G.M.P.: Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software, *Computer Science Review*, 24, pp. 13-33, 2017, doi: 10.1016/j.cosrev.2017.03.001
- [5] Datta, A., Winkelstein, P., Sen, S.: An agent-based model of spread of a pandemic with validation using COVID-19 data from New York State, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 585, 2022, doi: 10.1016/j.physa.2021.126401
- [6] Hoertel, N., Blachier, M., Blanco, C., Olfson, M., Massetti, M., Sanchez Rico, M., Limosin, F., Leleu, H.: A stochastic agent-based model of the SARS-CoV-2 epidemic in France, *Nature Medicine*, 26, pp. 1417 – 1421., doi: 10.1038/s41591-020-1001-6
- [7] Hamill, L., Gilbert, N.: *Agent-Based Modelling in Economics*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester (West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom), 2016
- [8] Vanfossan, S., Dagli, C.H., Kwasa, B.: An Agent-Based Approach to Artificial Stock Market Modeling, *Procedia Computer Science*, 168, pp. 161 - 169, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.02.280
- [9] Heinrichs, M., Behrisch, M., Erdmann, J.: Just do it! Combining agent-based travel demand models with queue based-traffic flow models, *Procedia Computer Science*, 130, pp. 858-864, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.04.081
- [10] Renna, A., Petrelli, M., Carrese, S., Bertocci, R.: An Innovative Simulation Agent-Based Model for the Combined Sea-Road Transport as a DSS, *Sustainability*, 13, pp. 1 - 17, doi: 10.3390/su131910773
- [11] Epstein, J. M.: *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*, Princeton University Press, 2007
- [12] SIMTWIST Project, WP 5 – Agent-Based Modelling, <https://www.simtwist.eu/wp-5-agent-based-modelling/>, 26.09.2023.
- [13] Lončar, G., Kulić, T., Kraus, R., Carević, D., Pećarević, M.: Analiza pronosa ličinki iz balastnih voda u akvatoriju luke Ploče, *Hrvatske vode*, 29(115), pp. 11 - 22, 2021
- [14] Kulić, T., Lončar, G., Kovačević, M., Fliszar, R.: Izbor oblika riblje staze s vertikalnim otvorima na temelju primjene ABM modela, *Građevinar*, 73(3), pp. 235 - 247, 2021, doi: 10.14256/JCE.3150.2021
- [15] Scheffer, M., Baveco, J.M., DeAngelis, D.L., Rose, K.A., van Ne, E.H.: Super-individuals a simple solution for modelling large populations on an individual basis, *Ecological Modelling*, 80(2-3), pp. 161-170, 1995, doi: 10.1016/0304-3800(94)00055-M

- [16] Hansen, F.T., Potthoff, M., Uhrenholdt, T., Vo, H.D., Linden, O., Andersen, J.H.: Development of a prototype tool for ballast water risk management using a combination of hydrodynamic models and agent-based modeling, *WMU J. Marit. Affairs*, 14, pp. 219-245, 2015
- [17] Pastor, A., Larsen, J., Thorbjørn Hansen, F., Simon, A., Bierne, N., Maar, N.: Agent-based modeling and genetics reveal the Limfjorden, Denmark, as a well-connected system for mussel larvae, *Marine Ecology Progress Series*, Inter Research, 2021, doi: 10.3354/meps13559
- [18] Dye, B., Jose, F., Richard, J., Brandi Mortensen, J., Milbrandt, E.C.: An agent-based model accurately predicts larval dispersal and identifies restoration and monitoring priorities for eastern oyster (*Crassostrea virginica*) in a Southwest Florida estuary, *Restoration Ecology*, 30(1), pp. 1 - 14, 2022, doi:10.1111/rec.13487
- [19] Wang, C., Feng, T., Wang, P., Hou, J., Qian, J.: Understanding the transport feature of bloom-forming *Microcystis* in a large shallow lake: A new combined hydrodynamic and spatiallyexplicit agent-based modelling approach, *Ecological Modelling*, 343, pp. 25 - 38, 2017
- [20] Kamykowski, D., Reed, R. E., Kirkpatrick, G.J.: Comparison of sinking velocity, swimming velocity, rotation and path characteristics among six marine dinoflagellate species, *Marine Biology*, 113, pp. 319-328, 1992, doi: 10.1007/BF00347287
- [21] Scotti, A.; Pineda, J.: Plankton accumulation and transport in propagating nonlinear internal fronts, *Journal of Marine Research*, 65, 117 – 145, 2007, doi: 10.1357/002224007780388702
- [22] Jiang, H., Kiorboe, T.: The fluid dynamics of swimming by jumping in copepods, *J. R. Soc. Interface*, 8, pp. 1090-1103, 2011, doi: <https://doi.org/10.1098%2Frsif.2010.0481>
- [23] Di Bacco, C., Sutton, D., McConnico, L.: Vertical migration behavior and horizontal distribution of brachyuran larvae in a low-inflow estuary Implications for bay-ocean exchange. *Marine Ecology Progress Series*, 217, pp. 191 – 206, 2001, doi: 10.3354/meps217191
- [24] Razvoj sustava kontrole i obrane luka od unosa stranih vrsta (ProtectAS), <https://protectas.com.hr/>, 27.06.2023.
- [25] Bernardini, G., Camilli, S., Quagliarini, E., D’Orazio, M.: Flooding risk in existing urban environment: from human behavioral patterns to a microscopic simulation model, *Energy Procedia*, 134, pp. 131–140, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.549
- [26] Kim, J., Takabatake, T., Nistor, I., Shibayama, T.: Towards Informed Tsunami Evacuation Management – A Direct Comparison between Agent-Based and GIS-Based Evacuation Models, *Proceedings of the 39<sup>th</sup> IAHR World Congress*, Granada, pp. 6386-6393, 2022, doi: 10.3850/IAHR-39WC2521716X2022544
- [27] Yang, L.E., Scheffran, J., Susser, D., Dawson, R., Chen, Y.D.: Assessment of Flood Losses with Household Responses: Agent-Based Simulation in an Urban Catchment Area, *Environmental Modeling and Assessment*, 23, pp. 369 - 388, 2018, doi: 10.1007/s10666-018-9597-3