

---

Nina Bogdanović

## Model alokacije zadataka kod mrava *Pogonomyrmex barbatus* i njene dinamike u zavisnosti od raspodele i dostupnosti hrane

---

*Postavljen je konceptualni model baziran na agentu (agent-based model – ABM) zavisnosti alokacije zadataka kod mrava Pogonomyrmex barbatus od dostupnosti hrane. Model je implementiran u programskom jeziku NetLogo 5.0.4. (Wilensky 1999). Agenti su podeljeni na tri vrste: patrolere, sakupljače i rezervne mrave. Na osnovu dostupnih literaturnih podataka o mravima Pogonomyrmex barbatus, definisani su parametri modela. To su frekvencija povratka patrolera i frekvencija povratka „uspešnih” sakupljača (sakupljača koji donose hranu). Iako pojednostavljen, model je pokazao da pojava i dinamika alokacije zadataka zavise od dostupnosti hrane. Potvrđen je značaj korišćenih parametara za adaptivno ponašanje kolonije.*

---

### Uvod

U kolonijama mrava, kao socijalnih insekata, kaste su grupe jedinki koje obavljaju različite zadatke u zavisnosti od fenotipa ili starosti. Neki od zadataka koje razlikujemo u koloniji mrava *Pogonomyrmex barbatus* Smith, 1858, a koje obavljaju različite kaste radnika, jesu patroliranje, održavanje mravinjaka, sakupljanje hrane i čišćenje. U kolonijama većine vrsta mrava postoje i rezervni radnici koji se nalaze unutar mravinjaka i izlaze iz njega ukoliko je potrebno povećati broj radnika na određenom zadatku. Međutim, može doći do preraspodele rada između kasta u smislu

drugačije alokacije zadataka unutar kolonije (Gordon *et al.* 2005).

Alokacija zadataka je proces kojim se prilagođava broj radnika na različitim zadacima, odnosno radnici menjaju svoj zadatak u zavisnosti od trenutne situacije. Alokacija zadataka se dešava u godišnjem, dnevnom ili kraćem vremenskom intervalu. Do alokacije zadataka ne dolazi usled centralne kontrole ili hijerarhijskom raspodelom, već trenutnim ili trajnim promenama u lokalnoj sredini svake jedinke. Svaki radnik koristi lokalne informacije, uključujući interakciju sa drugim radnicima, da prilagodi nivo svoje aktivnosti na nekom zadatku. Kombinacijom individualnih odluka formira se ponašanje kolonije (Greene i Gordon 2007).

Dva najčešća načina prenosa informacija u koloniji mrava su lučenje feromona ili detekcija ugljenih hidrata na kutikulama. U međusobnom kontaktu mravi antenama detektuju ugljene hidrate na kutikulama. Kako se različiti zadaci obavljaju u različitim sredinskim uslovima (vlažnost, temperatura, strujanje vazduha), dolazi do promene sastava ugljenih hidrata, karakteristične za određenu kastu i zadatak (Schafer *et al.* 2006, Greene i Gordon 2007). Jedno od pitanja vezanih za socijalne insekte je kako jedinke u koloniji na osnovu informacija o svojoj lokalnoj sredini i kontakta sa drugim jedinkama proizvode kompleksno ponašanje kolonije i njene brze adaptacije (Gordon 2002).

Kod mrava *Pogonomyrmex barbatus* u procesu sakupljanja hrane učestvuju kaste patrolera, sakupljača i, u slučaju alokacije zadataka, rezervni mravi ili druge kaste. Na slici 1 prikazana je šema alokacije rada izvan mravinjaka uočena kod *P. barbatus* prilikom eksperimentalnog povećavanja obima različitih poslova (Gordon *et al.* 2005). Šema pokazuje da sve kaste direktno ili indirektno prelaze u sakupljače, u slučaju da

---

*Nina Bogdanović (1995), Beograd, Lukijana Mušickog 22, učenica 3. razreda Šeste beogradske gimnazije*

*MENTOR: Dragan M. Jevtić, Institut nauka o životnoj sredini, Jagelonski univerzitet u Krakovu, Poljska*



Slika 1. Shema alokacije rada kod vrste *Pogonomyrmex barbatus* (Gordon *et al.* 2005)

Figure 1. Schema of task allocation in the colony of *Pogonomyrmex barbatus* (Gordon *et al.* 2005)

dođe do alokacije zadatka, odnosno u slučaju da su sredinski uslovi pogodni za sakupljanje, a izbor hrane obiman i dostupan.

Potrebe kolonije i dostupnost hrane navode se kao glavni parametri koji utiču na intenzitet sakupljanja (Schaffer *et al.* 2006), povećanje broja sakupljača i odabir lokacije na kojoj se sakuplja hrana, a samim tim i na raspodelu rada na zadacima van mravinjaka (čišćenje, održavanje i odbrana mravinjaka). Kod mrava sakupljača, patroleri su prvi mravi koji napuštaju mravinjak i traže lokacije sa hranom. Povratak određenog broja patrolera znači da su vremenski uslovi pogodni i da nema opasnosti od predatora. Povratak patrolera u minimalnoj frekvenciji 1/(10 s), stimuliše kretanje sakupljača tragom feromona ka lokacijama sa hranom (Gordon 2002; Greene i Gordon 2007). Na putu od pronađenog izvora hrane do mravinjaka patroleri ostavljaju trag feromona. Ukoliko sakupljači detektuju ugljene hidrate na kutikulama patrolera, izlaze iz mravinjaka. Sakupljači kreću tragom feromona ka odabranim lokacijama sa hranom, odnosno hrana se ne sakuplja na lokacijama koje prethodno nisu posetili patroleri (Gordon 2002). Nakon što nađu hranu, sakupljači je odnose u mravinjak (Greene i Gordon 2007). U slučaju povećane frekvencije povratka sakupljača sa hranom, dolazi do alokacije rada i veći broj radnika kreće u sakupljanje hrane. Frekvencija povratka sakupljača sa hranom povezana je s vremenom koje je potrebno da se hrana nađe, a samim tim i s njenom dostupnošću. Ako je izvor hrane veliki ili blizu, sakup-

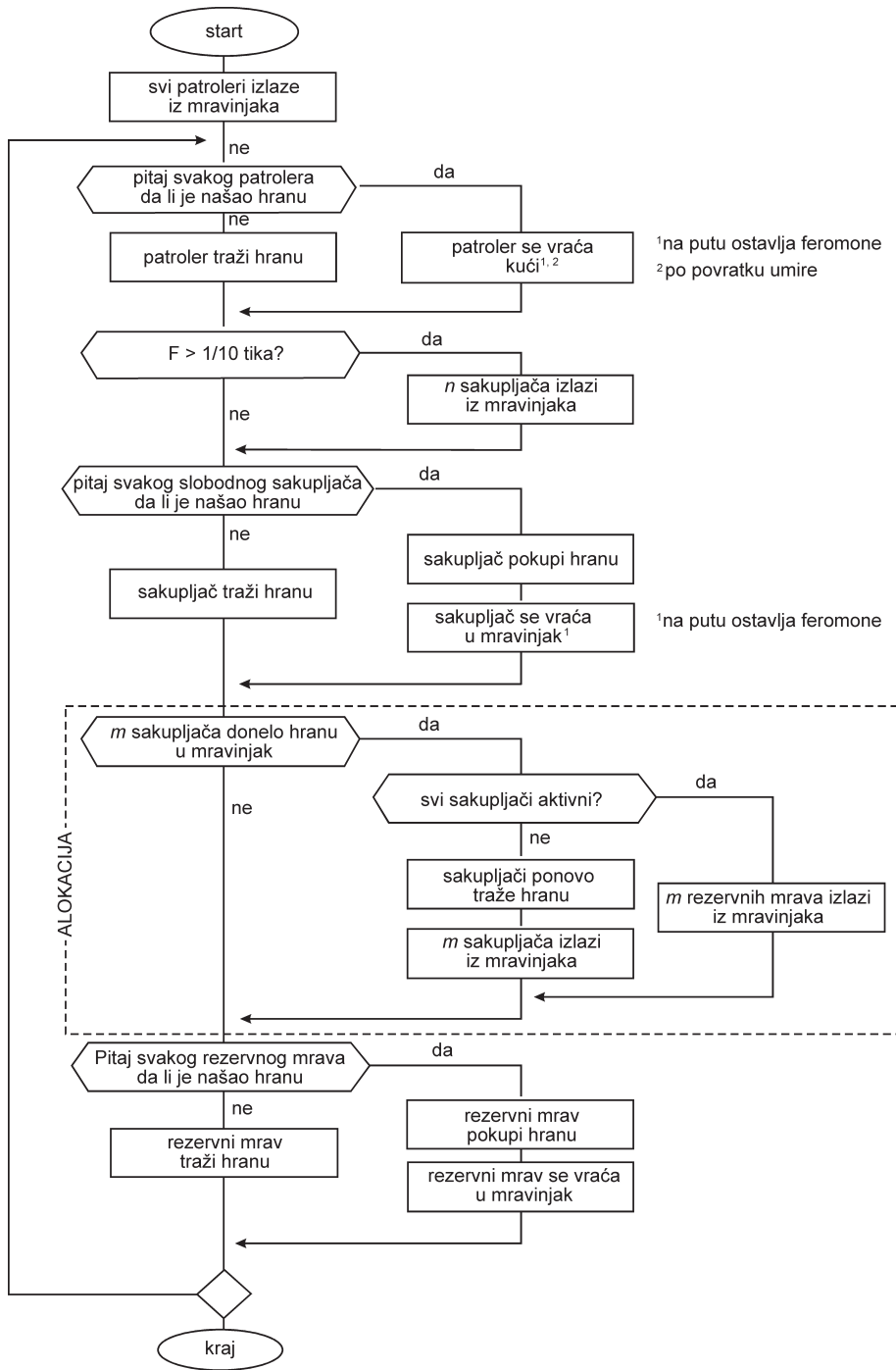
ljačima treba manje vremena da je nađu i da se vrate u mravinjak (Greene i Gordon 2007).

Da bi se objasnilo ponašanje pojedinih kompleksnih sistema i utvrdili ključni faktori koji utiču na razvoj tog sistema, često se koriste modeli. Upotreba modela omogućava ispitivanje uticaja odabranih parametara na sistem, koji se u eksperimentalnim uslovima ne bi mogli dovoljno izolovati. U istraživanju veze između lokalnih i globalnih pojava (npr. ponašanja jedinki i ponašanja kolonije) najčešće se koriste modeliranje zasnovano na agentu (agent-based modeling, ABM). Osnova ABM su aktivni entiteti (agenti) koji po definisanim pravilima međusobno interaguju u zajedničkom okruženju; samim tim dinamika ovakvog sistema nije definisana kao globalna funkcija, već je proizvod aktivnosti i interakcije agenata (Bandini *et al.* 2009). U svakom ABM potrebno je, u zavisnosti od modelirane pojave, definisati karakteristike agenata i okruženja (promenljive) kao i mehanizam (pravila) njihove interakcije (procedure). Jedna od platformi koje se koriste za postavljanje ABM je NetLogo (Wilensky 1999). NetLogo je posebno koristan za modelovanje socijalnih i bioloških fenomena koji vremenom evoluiraju.

U ovom radu postavljen je konceptualni agent-bazirani model alokacije zadatka u koloniji mrava vrste *Pogonomyrmex barbatus* i implementiran u NetLogo 5.0.4. U modelu su korišćene kaste patrolera i sakupljača, i grupa rezervnih mrava kao predstavnika svih ostalih kasti. Parametri modela su definisani na osnovu empirijskih podataka preuzetih iz literature. Cilj modela bio je da se prikaže organizacija kolonije prilikom sakupljanja hrane, odnosno da se prikaže zavisnost alokacije zadatka od prostorne raspodele i dostupnosti hrane.

## Model

Agent-bazirani model (ABM), koji simulira sakupljanje hrane u koloniji mrava, koncipiran je na osnovu podataka iz literature za vrstu *Pogonomyrmex barbatus*. Vrsta *P. barbatus* je uzeta kao model organizam zbog dostupnosti empirijskih podataka iz literature o alokaciji zadatka kod ovih mrava (npr. Greene i Gordon 2007). Kao osnova za implementaciju našeg modela korišćeni su modeli iz NetLogo biblioteke modela



Slika 2. Algoritam modela

Figure 2. Algorithm of the model

(model library). Pojedinačne procedure preuzete su iz *Ants model* (Wilensky 1997). Zbog jednostavnosti, u modelu su korišćene samo kaste patrolera, sakupljača i rezervnih mrava (kao predstavnika svih ostalih kasta). Za parametre koji utiču na razvoj sistema, odnosno aktivnost sakupljača, uzete su frekvencije povratka uspešnih patrolera i sakupljača na osnovu podataka uz literature (Gordon 2002; Greene i Gordon 2007). Važno je naglasiti da je model konceptualan – parametri su definisani na osnovu dostupnih podataka iz literature, ali njihove konkretne vrednosti su postavljene proizvoljno.

Algoritam modela predstavljen je na slici 2. U modelu postoje tri vrste agenata: patroleri, sakupljači i rezervni mravi. Sva tri tipa agenata karakteriše logička promenljiva *uspeh*. Agent je uspešan (*uspeh* = true) ako je našao izvor hrane. Patrolere karakteriše još i numerička promenljiva *energija*, dok sakupljače i rezervne mrave karakteriše logička promenljiva *sloboda*. Prilikom pokretanja simulacije, sakupljači i rezervni mravi su u mravinjaku. Kada promenljiva *sloboda* dobije vrednosti „true”, sakupljači i rezervni mravi postaju aktivni i mogu da se kreću van mravinjaka.

Vrednost energije patrolera određena je na početku simulacije, a smanjuje se u svakom koraku prilikom izvršenja glavne procedure. Energija je uvedena kao mera sposobnosti patrolera da opstane u okruženju; što je duža potraga za hranom, veće je opasnost od predatora ili različitih vremenskih nepogoda.

Agenti se kreću u okruženju ograničene površine koje je mrežom podeljeno na jedinice prostora (polja). Polja karakterišu logičke promenljive *mravinjak* i *hrana*, kao i numeričke promenljive *miris mravinjaka* i *feromoni*. Polja na kojima je *mravinjak* = true ili *hrana* = true, predstavljaju mravinjak ili hranu, respektivno. Miris mravinjaka predstavlja fiksni parametar u vremenu pomoću koga se agenti orijentišu pri povratku u mravinjak. Miris mravinjaka je najjači u centru mravinjaka, odnosno okruženja i smanjuje se linearno sa rastojanjem od centra.

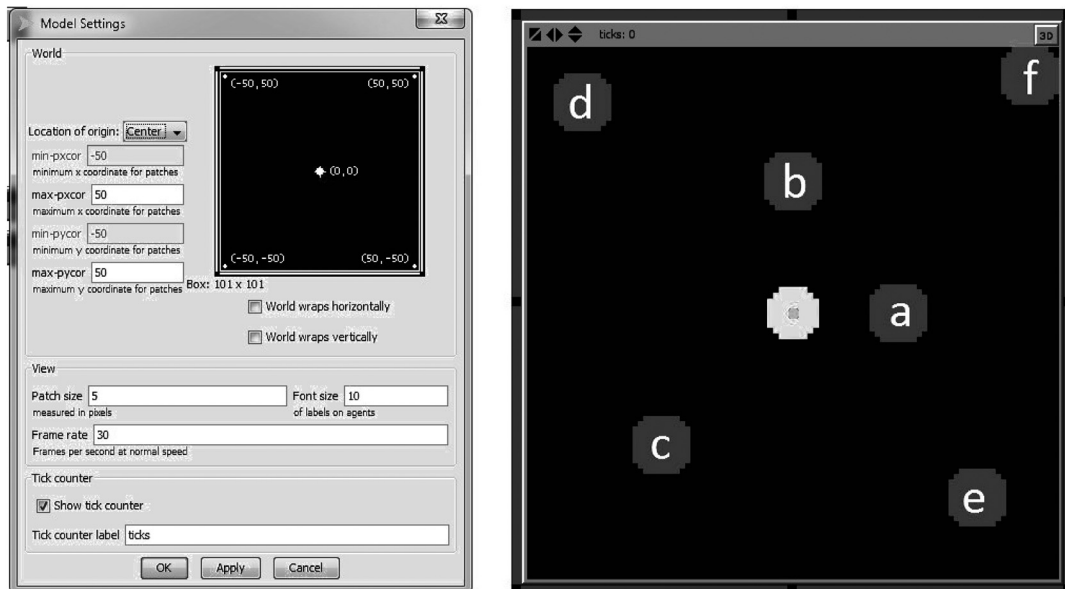
Glavna procedura, kojom je definisano ponašanje agenata, izvrši se jednom u jedinici vremena (tiku). U svakoj jedinici vremena svaki agent napravi jedan potez u skladu sa glavnom

procedurom (pomeri se za jedno polje ako je slobodan ili čeka da bude oslobođen).

Kada se pokrene simulacija, svi patroleri izlaze iz mravinjaka. Procedura za kretanje je preuzeta iz literature (Wilensky 1997). Kretanje je definisano na sledeći način: agent se okreće kombinacijom nasumičnog ugla manjeg od 45° na desno i na levo, a potom pomera za jedno polje unapred. Patroleri se na ovaj način kreću dok ne nađu hranu. Pri svakom pomeraju, odnosno pri svakom izvršenju glavne procedure, patroler gubi energiju. Patroler umire kada energija ima vrednost 0 ili kada se vrati u mravinjak nakon što je našao izvor hrane.

Svi agenti se vraćaju u mravinjak samo ako su uspešni, odnosno kada pronađu hranu. Agenti se vraćaju prateći miris mravinjaka, tj. proveravajući vrednost mirisa na poljima koji se nalaze ispred njih, 45° levo i 45° desno. Zatim se pomeraju na susedno polje na kojem je vrednost mirisa mravinjaka najveća (procedura preuzeta iz Wilensky 1997). Pri povratku u mravinjak, agenti ispuštaju feromone, odnosno povećavaju vrednost feromona za određenu vrednost na poljima po kojima se kreću. Feromon isparava, tako što se u svakom tiku njegova vrednost smanjuje za dati procenat. Feromon se, takođe, širi na okolna polja procedurom *diffuse* koja je definisana u skupu NetLogo procedura: feromon se raspoređuje ravnomerno na 8 susednih polja sa zadatim udelom (stopom) od početne vrednosti.

Ako je frekvencija dolaska patrolera koji su pronašli hranu u mravinjak veća od 1/10 tika (Gordon 2002; Greene i Gordon 2007), broj sakupljača jednak broju patrolera koji su se vratili u tom periodu postaje aktivan. Sakupljači kreću da pakupe hranu, prateći trag feromona. Praćenje feromona izvršava se na isti način kao praćenje mirisa mravinjaka. Kada nađu polje sa hranom, sakupljači pakupe hranu, odnosno vrednost promenljive *hrana* se promeni na tom polju (*hrana* = false). Sakupljači hranu odnose u mravinjak ostavljajući trag feromona. Kada ostave hranu, sakupljači ponovo odlaze u potragu prateći feromon. Rezervni mravi izlaze iz mravinjaka i postaju sakupljači ako su svi sakupljači izašli iz mravinjaka, odnosno ako su svi sakupljači aktivni i donose hranu. Broj aktiviranih rezervnih mrava u jednom tiku jednak je broju uspešnih sakupljača koji se u tom tiku vrata u mravinjak.



Slika 3. Podešavanje okruženja i njegove dimenzije (levo); okruženje sa izvorima hrane i mravinjakom (desno)

Figure 3. Settings for the world of the model and world's dimensions (left); the world of the model with the nest and food sources (right)

## Rezultati i diskusija

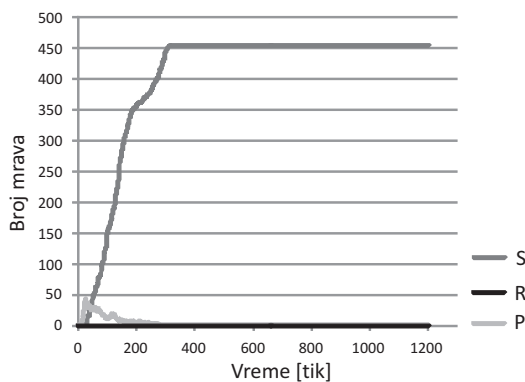
U našem modelu u simulaciji su zadate sledeće vrednosti promenljivih:

- broj agenata: 1000 (250 patrolera, 500 sakupljača, 250 rezervnih mrava)
- dimenzija okruženja: 100 × 100 polja
- mravinjak oblika kruga poluprečnika 5 u centru okruženja
- raspored izvora hrane (oblika kruga poluprečnika 5) na slici 3
- vrednost mirisa mravinjaka u centru okruženja (polje (0, 0)): 200
- energija patrolera: 1000
- vrednost feromona koji agenti ispuštaju: 6
- stopa isparavanja feromona: 10%
- stopa difuzije: 50%, što znači da svako polje dobija 1/16 vrednosti feromona od susednog polja

Na slikama 4, 5 i 6 predstavljena je dobijena dinamika aktivnosti mrava u zavisnosti od vremena i dostupnosti hrane. Na graficima je prikazan broj sakupljača i rezervnih mrava koji su

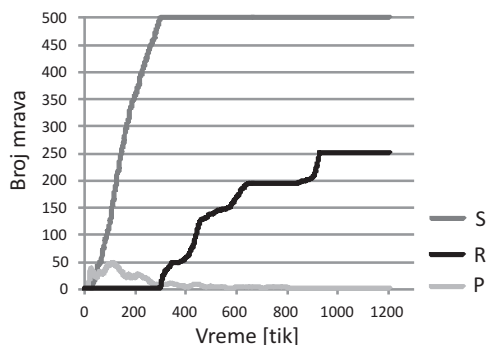
aktivni u sakupljanju hrane, kao i broj uspešnih patrolera (onih koji su se vratili u mravinjak nakon što su našli izvor hrane). Predstavljene su simulacije sa tri najbliža izvora hrane (a, b, c), tri najudaljenija izvora hrane (d, e, f), i svim izvorima hrane. Alokacija zadataka koja je uključivala mali broj rezervnih mrava primećena je prvi put u simulaciji s tri najudaljenija izvora hrane (slika 5), dok se u slučaju s tri najbliža izvora ne aktiviraju svi sakupljači (slika 4). Svi rezervni mravi obavljali su posao sakupljača kada su svi izvori hrane bili dostupni (slika 6).

Rezultati ovih simulacija sugerišu da je alokacija zadataka znatno brža i da veći broj rezervnih mrava prelazi u sakupljače kada je količina dostupne hrane veća, odnosno obim posla sakupljača povećan. Raspodela izvora hrane takođe utiče na dinamiku sakupljanja i pojavu alokacije. Kada su izvori hrane udaljeni, patrolerima treba više vremena da pronađu, a sakupljačima da u mravinjak donesu hranu. Tada frekvencija njihovog povratka usporava aktivaciju novih sakupljača (Schafer *et al.* 2006). Sporija aktivacija



Slika 4. Zavisnost broja aktivnih mrava od vremena za bliže izvore hrane (a, b, c, slika 3); P – patroleri, S – sakupljači, R – rezervni mravi

Figure 4. The number of active ants over time for near food sources (a, b, c, Figure 3); P – patrolers, S – foragers, R – inner-nest ants.

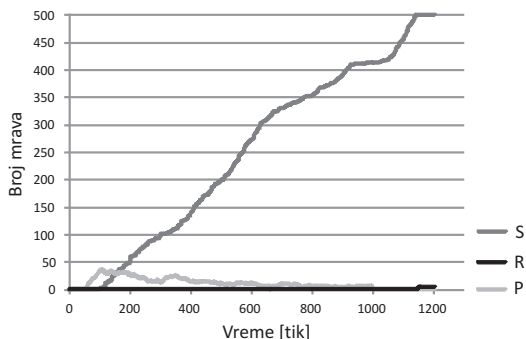


Slika 6. Zavisnost broja aktivnih mrava od vremena (svi izvori hrane); legenda ista kao na slici 4.

Figure 6. The number of active ants over time for all food sources; coding is the same as in Figure 4.

sakupljača može se primetiti upoređivanjem grafika na slikama 4 i 5.

Rezultati se slažu sa podacima iz literature da alokacija zadataka i aktivnost sakupljača zavise od dostupnosti hrane (Schafer *et al.* 2006). Ovaj model, iako pojednostavljen, pokazuje da frekvencije povratka sakupljača i patrolera mogu da igraju važnu ulogu u prenosu informacija u koloniji mrava (Greene i Gordon 2007).



Slika 5. Zavisnost broja aktivnih mrava od vremena za udaljenije izvore hrane (d, e, f, slika 3); legenda ista kao na slici 4.

Figure 5. The number of active ants over time for distant food sources (d, e, f, Figure 3); coding is the same as in Figure 4.

## Zaključak

Model alokacije zadataka mrava *Pogonomyrmex barbatus* zasnovan na agentu (agent-based model – ABM) i implementiran u NetLogo 5.0.4, iako pojednostavljen, daje uvid u osnovnu dinamiku i organizaciju kolonije prilikom sakupljanja hrane.

Rezultati simulacije pokazuju da raspored i dostupnost izvora hrane utiče na dinamiku alokacije. Alokacija zadataka uočena je u slučajevima kada su bili dostupni samo udaljeniji izvori hrane (tada je mali broj rezervnih mrava aktiviran), a bila je veoma izražena u varijantama kada su uključeni svi izvori hrane. Kada je izvor hrane udaljeniji, sporije se aktiviraju sakupljači i kasnije dolazi do alokacije zadataka. Rezultati, takođe, potvrđuju značaj frekvencije povratka uspešnih patrolera i sakupljača kao osnovnog faktora koji određuje dinamiku sakupljanja.

Ovakav model može da predstavlja dinamiku sakupljanja hrane u koloniji mrava u kraćim vremenskim intervalima, pošto uzima u obzir samo zadati broj mrava, a ne uključuje proces rasta i razvitka same kolonije (promenu broja mrava).



## Literatura

Bandini S., Manzoni S., Vizzari G. 2009. Agent Based Modeling and Simulation: An Informatics Perspective. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, **12** (4): 4.

Gordon D. 2002. The Regulation of Foraging Activity in Red Harvest Ant Colonies. *The American Naturalist*, **159**: 509.

Gordon D., Chu J., Lillie A., Tissot M., Pinter N. 2005. Variation in the transition from inside to outside work in the red harvester ant *Pogonomyrmex barbatus*. *Insectes Sociaux*, **52**: 212.

Greene M., Gordon D. 2007. Interaction rate informs harvest ant task decision. *Behavioral Ecology*, 10: 451.

Schafer R., Holmes S., Gordon D. 2006. Foraging activation and food availability in harvester ants. *Animal Behaviour*, **71**: 815.

Wilensky U. 1997. NetLogo Ants model. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. Dostupno na: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Ants>

Wilensky U. 1999. NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. Dostupno na <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

---

Nina Bogdanović

### Influence of Food Availability on the Task Allocation Dynamics in the Red Harvester Ant *Pogonomyrmex barbatus*: An Agent-Based Model

The agent-based model of task allocation in the ant *Pogonomyrmex barbatus* was imple-

mented in NetLogo 5.0.4. (Wilensky 1999). The model presents the basic dynamics and organization of the ant colony during foraging. Although five casts that are active outside the nest of *Pogonomyrmex barbatus* are empirically defined (Gordon *et al.* 2005), the agents were divided in three casts in the model: patrollers, foragers and inner-nest ants representing all other casts. The number of agents (ants) was set in the beginning of the simulation (250 patrollers, 500 foragers, 250 inner-nest ants). The parameters of the model were established based on available literature on *P. barbatus* (Green and Gordon 2007). The return rates of foragers with food and patrollers (after finding food) were incorporated in model as parameters. This was because the rate of return of successful foragers and patrollers could provide information for the rest of the colony about the success of foraging for that period.

Three cases of food distribution were chosen as representative results of the simulations: three nearest (a, b, c), three most distant (d, e, f), and all food sources (Figure 3).

The results of the simulations show that the dynamics of task allocation is influenced by food availability. A low number of inner-nest ants were allocated to a different task in the case of the most distant food sources (Figure 5). In contrast, a high number of inner-nest ants were allocated to a different task when all food sources were available (Figure 6). When the food source was distant, the activation of foragers was slower, which can be noticed by comparing figures 4 and 5.

Results of the simulation confirm that the rate of interaction among workers plays an important role in regulating the colonies' activities, and that the return rates of patrollers and foragers are crucial for the dynamics of foraging.

This simplified model represents the dynamics of foraging for shorter time periods, as it does not include the growth of the colony, as the number of ants was fixed in the beginning. 